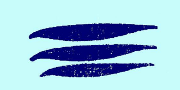
ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

L. PASTOURIAUX
M. BELLIER
A. VAROQUAUX
A. GALICHON

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

LOIS GÉNÉRALES



LIBRAIRIE DELAGRAVE

108e Mille

BIBLIOTHÈQUE DE L'ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE

Directeur :

L. PASTOURIAUX, Inspecteur général honoraire de l'Enseignement technique

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

LOIS GÉNÉRALES

à l'usage des Lycées techniques
et des Écoles d'Électricité industrielle

par

L. PASTOURIAUX

Inspecteur général honoraire de l'Enseignement technique.

A. VAROQUAUX

Directeur de l'École nationale professionnelle de Nancy.

M. BELLIER

Agrégé des Sciences physiques. Professeur d'électricité au Conservatoire National des Arts-et-Métiers.

et

A. GALICHON

Professeur à l'École nationale d'ingénieurs Arts-et-Métiers de Paris.



PARIS

LIBRAIRIE DELAGRAVE

1962

PROGRAMMES
DES ÉCOLES NATIONALES PROFESSIONNELLES

ÉLECTRICITÉ

1re Partie

Cours de 2e T. I. (1 heure par semaine).

Énergie.

Rappel des notions de force, de couple, de travail mécanique, d'énergie, de puissance. Unités; valeur de l'équivalent mécanique, de l'unité de quantité de chaleur.

Électrocinétique.

Propriétés générales du courant électrique. — Existence des générateurs et des récepteurs électriques; isolants et conducteurs; circuit et courant électriques.

Effet thermique, chimique, magnétique. Sens conventionnel du courant; définition du courant continu et d'un régime permanent. Existence du courant alternatif.

Quantité d'électricité et intensité du courant. — Définition électrolytique de la quantité d'électricité; intensité du courant électrique. Définitions provisoires du coulomb et de l'ampère. Ampère-heure. Existence des ampèremètres.

Définition d'une dérivation; loi des intensités.

Énergie reçue par une portion de circuit; différence de potentiel. — Notion et définition de la différence de potentiel ($U = W : Q = W : It$); unité de différence de potentiel : le volt. Existence du voltmètre.

Addition des tensions pour des récepteurs en série.

Expression de la puissance ($P = UI$); principe de sa mesure. Mesure de l'énergie : lecture d'un compteur.

Résistance électrique.

Résistance électrique d'un conducteur ($R = U : I$); unité de résistance, l'ohm. Loi d'Ohm pour une résistance morte; chute ohmique de tension. Principe de la mesure d'une résistance à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

Résistance d'un conducteur filiforme à une température donnée; résistivité $\left(R = \rho \frac{l}{S}\right)$. Facteurs dont dépend la résistivité; l'influence de la température.

Isolants.

Action thermique du courant. — Expression de la chaleur dégagée dans un conducteur soumis à une différence de potentiel; loi de Joule. Température de régime permanent.

Conséquences de l'effet Joule; récepteurs thermiques, fusibles. Notions sommaires sur le dimensionnement des conducteurs; densité de courant.

Résistance du corps humain; danger du courant.

Groupement des résistances mortes. — Association des résistances mortes en série, en parallèle, en série-parallèle; résistance équivalente : définition et expressions.

Applications : rhéostats, boîtes de résistances, résistances additionnelles d'un voltmètre shunts d'un ampèremètre.

Force électromotrice d'un générateur. — Énergie et puissance totales produites par un générateur; définition de sa force électromotrice. Résistance interne, puissance nominale. Tension aux bornes; chute interne de tension. Rendement électrique.

Couplage des générateurs.

Force contre-électromotrice d'un récepteur chimique ou mécanique. — Puissance électrique utilement transformée en puissance chimique ou mécanique; définition de la force contre-électromotrice. Résistance interne; puissance nominale. Tension aux bornes; chute interne de tension. Rendement électrique.

Couplage des récepteurs. Principe de la distribution sous tension constante.

Généralisation de la loi d'Ohm pour un circuit fermé.

Électrolyse. — Loi qualitative fondamentale et réactions secondaires. Lois quantitatives; formule de Faraday.

Notions sommaires sur les applications électro-chimiques et électro-métallurgiques. Principe de la galvanoplastie et du traitement de surface.

Piles hydro-électriques. — Notions très sommaires sur leur fonctionnement; polarisation et moyens de l'atténuer. Piles usuelles; éléments Leclanché, Féry, Daniell. Existence de l'élément étalon (Weston).

Existence de la force électromotrice thermo-électrique; couple thermo-électrique.

Accumulateurs. — Principe de l'accumulateur. Accumulateur au plomb (acide) et accumulateur cadmium-nickel (alcalin). Charge et décharge. Grandeurs caractéristiques; force contre-électromotrice, force électromotrice, résistance interne, capacité, débit, rendements. Usages.

2e et 3e Partie.

Cours de première T. I. (2 heures par semaine).

Électromagnétisme.

Champ des aimants et des courants. — Aimants permanents, pôles. Champ magnétique; lignes de champ. Composition des champs.

Champ magnétique terrestre; boussole magnétique.

Champ magnétique des courants; relation entre l'ampère-tour par centimètre et l'œrsted.

Aimantation par influence. — Existence de l'aimantation par influence. Cas des aimantations temporaire et permanente. Intensité d'aimantation; induction et perméabilité magnétiques.

Définition du flux d'induction magnétique; maxwell et weber. Existence du fluxmètre. Conservation du flux d'induction.

Courbes d'aimantation du fer et des matériaux ferro-magnétiques. Point de Curie ferromagnétique. Notions sur l'hystérésis.

Force électromagnétique. — Action d'un champ d'induction sur un courant; actions électromagnétiques et électrodynamiques. Définition légale de l'ampère.

Travail des forces électromagnétiques; loi du flux maximum.

Phénomènes d'induction électromagnétique. — Force électromotrice d'induction électromagnétique; lois.

Courants de Foucault; applications.

Auto-induction; inductance, henry. Énergie électromagnétique du champ d'un courant.

Induction mutuelle.

Notions sommaires sur les appareils de mesure. — Appareils magnéto-électriques : galvanomètres, ampèremètres, voltmètres. Appareils électro-dynamiques. Appareils ferro-magnétiques. Appareils thermiques. Wattmètres.

Courants alternatifs.

Condensateurs. — Existence des phénomènes d'électrostatique, condensateurs; capacité, farad.

Énergie d'un condensateur chargé.

Pouvoir inducteur spécifique; rigidité diélectrique.

Groupements des condensateurs.

Propriétés générales du courant alternatif. — Définition du courant alternatif; période et fréquence. Ses effets.

Courant alternatif sinusoïdal; amplitude et pulsation. Représentations algébrique et géométrique des intensités, des tensions, des forces électromotrices. Règles de Fresnel.

Valeur instantanée, maximum et efficace d'une intensité, d'une tension, d'une force électromotrice. Principe de leur mesure.

Puissance en courant alternatif. — Puissance active. Puissance apparente; volt-ampère. Facteur de puissance et principe de sa mesure. Puissance réactive, volt-ampère réactif.

Théorème de Boucherot; applications.

Facteur de puissance d'une installation; importance de son relèvement. Tarification de l'énergie alternative.

Résistance, inductance, capacité sous tension alternative. — Relation entre l'intensité et la différence de potentiel aux bornes d'une résistance, d'une inductance, d'une capacité; déphasage du courant sur la tension et puissance consommée.

Groupements en série ou en parallèle des récepteurs précédents. Impédance. Résonance série et résonance parallèle.

Utilisation des capacités au relèvement d'un facteur de puissance.

Courants polyphasés. — Intérêt des générateurs à induits multiples. Forces électromotrices et courants triphasés. Montages en étoile et en triangle. Puissance en triphasé.

Ire PARTIE

EFFETS CALORIFIQUES ET CHIMIQUES DU COURANT CONTINU

« Observer d'abord les faits, en varier les circonstances autant qu'il est possible, accompagner ce premier travail de mesures précises pour en déduire des lois générales, uniquement fondées sur l'expérience, et déduire de ces lois, indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces qui produisent les phénomènes, la valeur mathématique de ces forces, c'est-à-dire la formule qui les représente, telle est la marche qu'a suivie Newton. Elle a été, en général, adoptée en France par les savants auxquels la Physique doit les immenses progrès qu'elle a faits dans ces derniers temps, et c'est elle qui m'a servi de guide dans toutes mes recherches sur les phénomènes électrodynamiques. »

AMPÈRE.

Dans les leçons d'électricité du présent ouvrage, nous avons essayé d'employer systématiquement la méthode expérimentale décrite par Ampère.

I. — L'ÉNERGIE

1re LEÇON

Le travail mécanique.

1. Une force travaille quand son point d'application se déplace.

Un cheval tire sur un chariot.

1° Si le char ne se déplace pas, le cheval se fatigue en vain (fig. 1); malgré ses efforts, il ne produit pas d'effet utile.

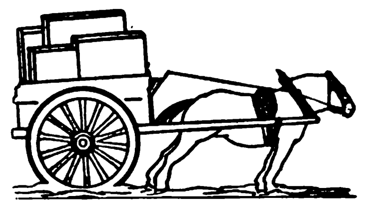


Fig. 1. — Le cheval tire de toute sa force sur le chariot embourbé qui n'avance pas. *Cette force ne produit pas de travail.*

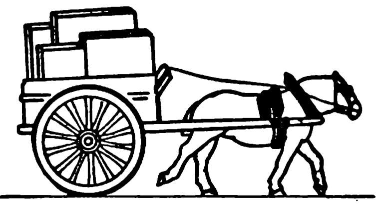


Fig. 2. — Ici, la force de traction du cheval a pour effet d'entraîner le chariot. *Cette force produit du travail mécanique.*

2° Si le char avance (fig. 2), nous sommes d'accord pour dire que le cheval produit du travail; ou mieux, que la force de traction du cheval travaille [1].

On dit qu'une force travaille quand son point d'application se déplace.

Le travail ainsi produit se nomme *travail mécanique*, ou simplement *travail*.

1. En mécanique, un homme, un cheval, une locomotive ne travaillent pas; *seules les forces travaillent.*
Mais dans le langage courant on dit souvent : l'homme, le cheval, le moteur travaillent, parce qu'ils exercent les forces qui travaillent.

2. Le déplacement du point d'application peut être ou non dans la direction de la force.

Expériences. — Lâchons une pierre sans la lancer; elle tombe verticalement, sous l'action d'une seule force, son poids, appliqué au centre de gravité de la pierre. Le point d'application se déplace ici dans la direction de la force (fig. 3).

Soulevons un fardeau, en le tirant verticalement de bas en haut avec une corde, comme fait Paul (fig. 5). Le point d'application de la force T se déplace dans la direction de cette force.

Mais une pierre jetée dans l'espace, un obus lancé par un canon, se déplacent en décrivant des paraboles (fig. 4). Or, le poids de l'obus ne cesse de s'exercer sur lui, dans la direction verticale, sens de haut en bas; le déplacement du centre de gravité de l'obus, point d'application de son poids, n'a pas lieu dans la direction de cette force; cependant cette force travaille.

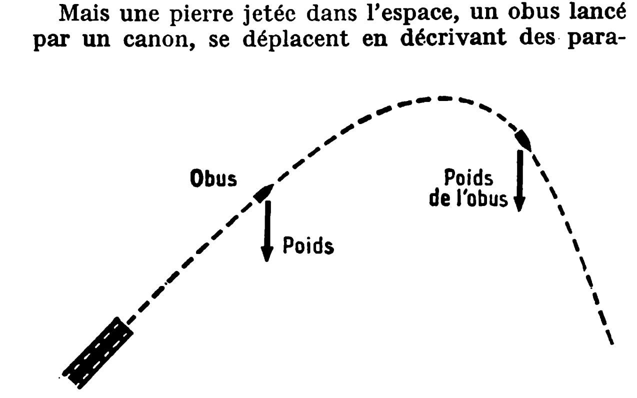


Fig. 3. — Exemple d'une force dont le point d'application se déplace dans la direction de la force.

Fig. 4. — Exemple d'une force, le poids de l'obus, dont le point d'application ne se déplace pas dans la direction de cette force.

Vous trouverez sans peine de nombreux exemples de l'un et l'autre cas. Mais, pour simplifier, il ne sera question jusqu'à nouvel ordre que des *forces dont le point d'application se déplace dans la direction de la force.*

3. Le travail d'une force dont le point d'application se déplace dans la direction de la force dépend de deux facteurs : grandeur de la force, longueur du déplacement.

Regardons la figure 5.

1° Jacques a travaillé deux fois plus que Paul, puisque Paul devrait recommencer sa manœuvre et hisser une nouvelle charge de 30 *kgf* de briques pour obtenir le même effet utile que Jacques. La force G de

60 *kgf* **a donc** effectué un travail deux fois plus grand que la force F 30 *kgf* pour le même déplacement : ***le travail d'une force est proportionnel à la grandeur de la force.***

2° Pierre a travaillé deux fois plus que Paul, puisque Paul devrait

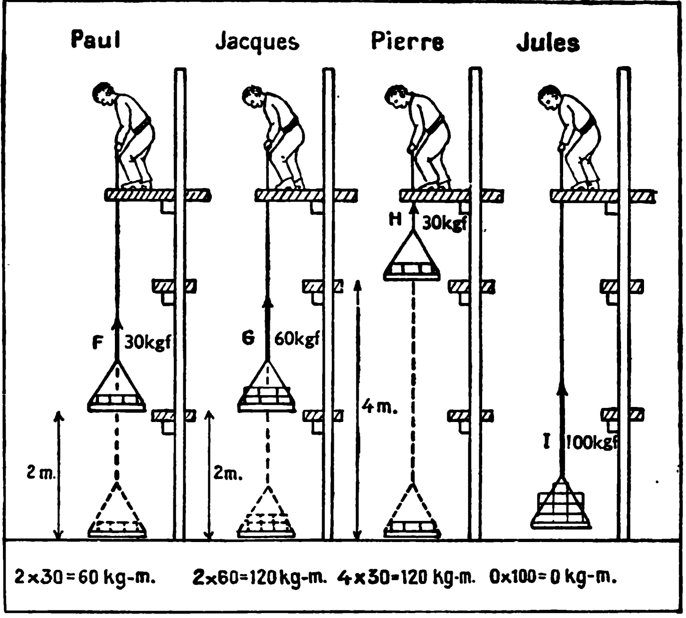


Fig. 5. — Le travail d'une force est proportionnel à la grandeur de la force et à la grandeur du déplacement.

recommencer sa manœuvre et hisser sa charge de 2 mètres encore pour obtenir le même effet utile que Pierre. La force de 30 *kgf* a donc effectué un travail deux fois plus grand que la force F de même grandeur qu'elle : ***le travail d'une force est proportionnel au déplacement du point d'application dans la direction de la force.***

3° Jules a pendant longtemps soutenu en l'air 100 *kg* de briques. Il n'a pas travaillé quoiqu'il soit très fatigué. Il n'avait qu'à attacher la corde à une poutre : il aurait obtenu le même effet sans fatigue. La force I, dont le point d'application reste immobile, ne travaille pas.

4. L'unité de travail des mécaniciens est le kilogrammètre. ***Le kilogrammètre (symbole : kgm) est le travail produit par une force de 1 kilogramme-force dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force*** (fig. 6).

Exemples. — Un corps pèse 1 *kgf*; il tombe de 1 *m;* son poids produit un travail de 1 *kgm.*

Vous tirez sur un corps quelconque avec une force de 1 *kgf* et vous le

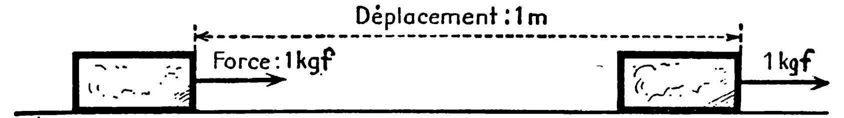


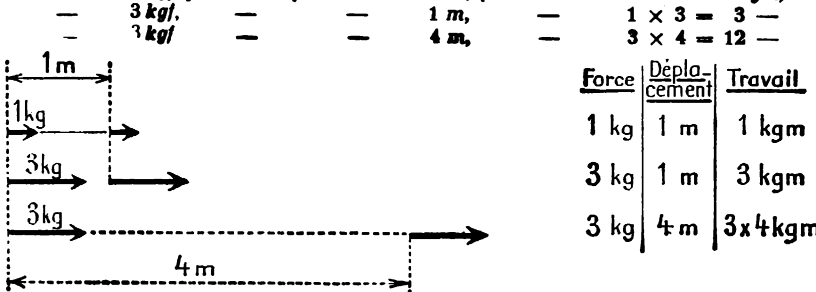
Fig. 6. — Cette force de 1 *kilogramme*, dont le point d'application s'est déplacé de 1 *mètre* dans la direction de la force, a produit un travail de 1 *kilogramme.*

déplacez de 1 *m* dans la direction où vous le tirez; le travail de la force est de 1 *kgm.*

5. Quel est le travail produit par une force de 3 kilogrammes dont le point d'application se déplace de 4 mètres dans la direction de la force?

Appliquons la définition précédente et les deux propositions du paragraphe 3.

Une force de 1 *kgf*, pour un déplacement de 1 *m*, produit un travail de : 1 *kgm*,
— 3 *kgf*, — — 1 *m*, — 1 × 3 = 3 —
— 3 *kgf* — — 4 *m*, — 3 × 4 = 12 —



Force	Déplacement	Travail
1 kg	1 m	1 kgm
3 kg	1 m	3 kgm
3 kg	4 m	3x4kgm

Fig. 7. — La force de 3 *kgf* qui déplace son point d'application de 4 *m* dans sa direction produit un travail de 3 × 4 = 12 *kgm.*

Le même raisonnement quand la force est de F *kilogrammes* et le déplacement de L *mètres* conduit à la formule :

$$\underset{kgm}{W} = \underset{kgf}{F} \times \underset{m}{L}$$

6. Le joule est une autre unité de travail.

Les électriciens pour évaluer un travail emploient souvent une unité autre que le kilogrammètre, le *joule* (symbole J).

1 kilogrammètre vaut 9,81 joules.

7. Un travail mécanique peut être moteur ou résistant.

Un corps (fig. 8) que l'on soulève verticalement est **soumis à l'action** de deux forces :

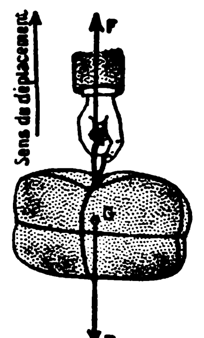


Fig. 8. — La force F produit un *travail moteur*. La force P produit un *travail résistant*.

1° la force F qui produit le mouvement de bas en haut : c'est la ***force motrice; son travail est dit travail moteur;***

2° le poids P du corps, qui **agit en sens contraire** du mouvement : c'est la ***force résistante; son travail est dit travail résistant.***

Dans les calculs, on distingue le travail moteur et le travail résistant en considérant **le premier comme** *positif*, **le second comme** ***négatif.***

Résumé.

1. **— Une force travaille lorsque son point d'application se déplace. Lorsque le déplacement a lieu dans la direction de la force, le travail produit est mesuré par le produit de la force par le déplacement.**

2. **— Ce travail est *moteur* si le déplacement se fait dans le sens de la force; il est *résistant* si le déplacement a lieu en sens contraire.**

3. **L'unité de travail des mécaniciens est le *kilogrammètre* : c'est le travail produit par une force de 1 kilogramme-force dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.**

L'unité de travail des électriciens est le *joule* : 1 *kgm* = 9,81 *J*.

Exercices.

1. Quel travail, évalué en kilogrammètres, faut-il effectuer pour élever 4 sacs de charbon au quatrième étage d'une maison? Chaque sac pèse 50 *kg*. Chaque étage a une hauteur de 4 *m*.

2. Évaluer en joules un travail de 75 *kgm*.

3. Évaluer en *kgm* un travail de 1 joule.

4. A quelle hauteur faut-il élever un poids de 1 *kg* pour produire un travail de 1 *J*?

5. En une journée de 8 heures, un homme fournit environ 200 000 *kgm*. Son salaire est de 1,2 NF l'heure, s'y ajoutent 50 % de taxes diverses.

Un moteur électrique, dont le fonctionnement coûte 0,2 NF par heure, produit en 1 *heure* 270 000 *kgm*.

Combien le travail mécanique humain coûte-t-il de fois plus que le travail d'un moteur électrique?

La notion de puissance mécanique.

1. Un même travail peut être effectué en des temps différents.

Pour élever un sac de charbon pesant 50 *kgf* au quatrième étage d'une maison, soit à une hauteur de 15 *m*, un homme prendra le sac sur son épaule et montera l'escalier en 100 secondes. Il fournira un travail de 50 × 15 = 750 *kgm* en 100 secondes, soit 7,5 *kilogrammètres par seconde* (7,5 *kgm/s*).

Un enfant portera le charbon par fractions de 10 *kgf* et mettra 10 minutes pour amener les 50 *kgf* à 15 *m* de hauteur. Il fournira le même travail, 750 *kgm*, en 600 secondes soit 1,25 *kgm/s*.

2. Plus une machine produit de travail pendant chaque seconde, plus elle est puissante.

Bien que l'homme et l'enfant aient fourni le même travail, on dit que l'homme, parce qu'il y a mis moins de temps, est plus *puissant* que l'enfant; et, avec plus de précision, que l'homme est 6 fois plus puissant parce qu'il a fourni 6 fois plus de travail que l'enfant pendant chaque seconde.

La puissance mécanique* [1] *d'une machine est mesurée par le travail que cette machine fournit pendant chaque seconde.

3. Les unités principales de puissance sont le kilogrammètre par seconde et le watt.

1° Le *kilogrammètre par seconde* (symbole *kgm/s*) est la puissance d'une machine qui fournit un travail de 1 kilogrammètre pendant chaque seconde.

Un multiple très employé de cette unité est le *cheval-vapeur* (symbole : *ch*) : c'est la puissance d'une machine qui effectue un travail de 75 kilogrammètres par seconde.

1 ch = 75 kgm/s

2° Au *joule*, unité de travail, correspond le *watt*, unité de puissance. Le *watt* (symbole *W*) est la puissance d'une machine qui fournit un travail de 1 joule pendant chaque seconde.

1 W = 1 J/s

1. Dorénavant, nous dirons simplement *puissance* pour *puissance mécanique.*

Les électriciens utilisent beaucoup le *kilowatt* (symbole *kW*) qui vaut 1 000 watts.

4. 1 cheval-vapeur vaut 736 watts.

En effet, par définition, 1 cheval-vapeur est la puissance d'une machine qui fournit un travail de 75 kilogrammètres pendant chaque seconde.

Or, 1 kilogrammètre vaut 9,81 joules; 75 kilogrammètres valent :

$$9,81 \times 75 = 736 \text{ joules.}$$

Donc 1 cheval-vapeur vaut 736 joules par seconde, soit 736 watts.

1 ch = 736 W = 0,736 kW

5. Certaines unités de travail sont dérivées des unités de puissance : le kilowatt-heure.

On emploie aussi comme unité de travail le ***watt-heure*** (symbole ***Wh***), *travail produit par une machine de puissance* 1 *watt fonctionnant pendant* 1 *heure*, et surtout le *kilowatt-heure* (symbole *kWh*), travail produit par une machine de puissance 1 kilowatt en 1 heure.

1 watt-heure = 3 600 joules
1 kilowatt-heure = 3 600 kilojoules.

Résumé.

1. — **La puissance d'une machine se mesure par le travail qu'elle fournit pendant chaque seconde.**

2. — **Les unités de puissance usuelles sont :**
- le kilogrammètre par seconde ***(kgm/s)***;
- le cheval-vapeur ***(ch) : 1 ch = 75 kgm/s***;
- le watt ***(W)***; 1 ***W = 1 J/s***;
- le kilowatt ***(kW)***.

3. — **Le *watt-heure (Wh)*, le *kilowatt-heure (hWh)*, sont des unités de travail fort employées par les électriciens.**

Exercices.

1. Que signifie l'expression : un moteur est 5 fois plus puissant qu'un autre?

2. Un moteur dont la puissance est de 10 chevaux travaille 8 heures par jour.

a) Quel est le travail fourni pendant ces 8 heures exprimé en kilogrammètres, en kilowatts-heures?

b) Par analogie avec la définition du watt-heure, définissez ce qu'on entend par *cheval-heure* (symbole : *ch-h*).

Quel est, exprimé en chevaux-heures, le travail fourni par un moteur de 10 *ch* qui travaille pendant 8 *h*?

c) Dans quels cas est-il commode d'utiliser, comme unité de travail, le cheval-heure?

3. Un moteur de 0,5 *ch* peut-il fournir le même travail qu'un moteur de 20 *ch*? Justifiez votre réponse.

4. Une chute d'eau débite 24 m^3 par minute. Cette eau tombe d'une hauteur de 6 *m* :

1° Quel est le travail effectué par le poids de chaque litre d'eau qui tombe?

2° Quel est le travail du poids de l'eau qui tombe pendant une seconde?

3° Quelle est la puissance de la chute, évaluée en chevaux-vapeur?

5. Quelle est, évaluée en kilowatts, la puissance d'un moteur de 20 chevaux?

6. Combien un kilowatt-heure vaut-il de kilogrammètres, de chevaux-heures?

7. Une locomotive entraîne un train à la vitesse de 80 *km/h*. Elle exerce sur la barre d'attelage une force de 2 000 *kgf*. Quelle est sa puissance utile en chevaux?

8. L'éclairage d'une salle de classe est assuré par 8 lampes consommant chacune une puissance électrique de 200 watts. Les lampes restent allumées 4 heures par jour. Quel est le prix journalier de l'éclairage, sachant que le kilowatt-heure coûte 0,28 NF.?

LECTURE

Un mécanicien de génie : Watt.

C'est à JAMES WATT *ingénieur mécanicien anglais, que sont dus les perfectionnements de la machine à vapeur qui en firent une machine industrielle.*

Watt naquit en 1736 *à Greenock en Ecosse. Il était de famille pauvre et sa santé fut toujours délicate. Il fit à Londres l'apprentissage du métier de mécanicien. A* 22 *ans, il travaillait pour un médiocre salaire à l'Université de Glascow à la fabrication d'instruments de physique. En* 1764, *il eut à réparer une machine à vapeur; cet incident détermina sa carrière : Watt entreprit de perfectionner le modèle et, après quelques années de travail, il y réussit.*

La première machine à vapeur construite par Denis Papin, en 1690, *consistait en un cylindre vertical qui contenait un piston mobile sur toute la longueur du cylindre.*

Un peu d'eau était mis au fond de l'appareil. On chauffait cette eau. La vapeur produite poussait le piston jusqu'à la partie supérieure du cylindre. On éloignait le feu, la vapeur se condensait et la pression atmosphérique faisait redescendre le piston.

Un ingénieur, NEWCOMMEN, *s'avisa d'installer une chaudière pour envoyer de la vapeur dans le cylindre et pousser le piston. Pour produire le mouvement inverse, après avoir fermé le robinet d'arrivée de vapeur, on injectait de l'eau froide qui condensait la vapeur dans le cylindre.*

On raconte que c'est un enfant, HUMPHRY POTTER, *qui, chargé de manœuvrer les robinets d'arrivée de vapeur et d'eau, imagina de les commander par des ficelles que la machine en mouvement tirait en temps voulu. Le fonctionnement rendu automatique, Potter pouvait s'esquiver sans dommage et rejoindre des camarades de jeu.*

Condenser la vapeur dans le cylindre, c'était refroidir la machine à chaque course du piston et perdre beaucoup de chaleur. La première invention de Watt fut de mettre le cylindre, quand il est plein de vapeur, en communication avec le réservoir froid, nommé condenseur, *d'où l'air a été chassé. La pression de la vapeur dans le cylindre s'abaisse alors jusqu'à la valeur faible de la pression maximum de la vapeur d'eau à la température du condenseur (principe de Watt ou de la paroi froide).*

Watt put s'associer avec un puissant industriel, Boulton, pour exploiter son invention. Une usine fut créée à Soho, près de Birmingham. Watt imagina alors bien d'au-

tres perfectionnements : il inventa la machine à double effet *dans laquelle la vapeur agit alternativement sur les deux faces du piston,* le tiroir de distribution, *le* volant, *le* régulateur à force centrifuge *et le* parallélogramme[1] *qui porte son nom. Son génie lui suscita de nombreux envieux qui lui contestaient la paternité et le profit de ses inventions. Ce n'est qu'en* 1799 *que finirent, à son profit, les procès qui lui avaient été intentés.*

Mais l'usine de Soho avait prospéré. Elle était connue dans le monde entier et beaucoup d'ingénieurs mécaniciens y venaient en voyage d'études.

Le type de machine à vapeur de Watt à balancier a été fort répandu. On en trouvait encore en fonctionnement dans quelques usines françaises il y a une cinquantaine d'années.

Au cours de sa féconde carrière, Watt s'était enrichi et il avait aussi acquis une forte instruction. Il était très compétent en physique, chimie, architecture et musique. Les principales langues et littératures européennes lui étaient familières.

Quand il mourut, en 1819, *il était membre des Sociétés royales de Londres et de Glasgow. L'Institut de France l'avait élu Membre correspondant en* 1808, *malgré que l'Angleterre et la France fussent alors en guerre.*

L'œuvre essentielle de Watt a donc été, en rendant pratique la machine à vapeur, de créer une source d'énergie mécanique commode et puissante. Le développement énorme de l'industrie en est résulté, ainsi que les chemins de fer et la navigation à vapeur. Le XIXe *siècle a été le siècle de la vapeur. Le travail d'un homme a déterminé l'évolution et le caractère de la civilisation moderne.*

Aussi la Conférence internationale des unités et étalons électriques, réunie à Londres en 1908, *a-t-elle donné le nom de Watt à l'unité de puissance mécanique et électrique.*

1. Voir *Cours de Mécanique Basquin*, IIe partie (Delagrave, éditeur).

Les formes usuelles de l'énergie.

I. — Énergie mécanique.

1. L'énergie est le pouvoir de produire du travail mécanique.

Observons le pilon à planche d'un atelier de forge (fig. 1).

Il se compose d'un *marteau,* bloc d'acier pesant par exemple 50 *kgf.* attaché à une *planche*. Deux poulies tournant en sens contraire et poussées contre la planche l'entraînent verticalement à une hauteur de 1,50 mètre. Quand le marteau est en haut de sa course, le forgeron manœuvre un levier qui écarte les poulies; le marteau tombe et écrase le fer rouge placé sur l'enclume.

Soulever le marteau à une hauteur de 1,50 *m* exige un travail de

$$50 \times 1,5 = 75 \ kgm.$$

Ce travail est fourni par le moteur électrique qui commande les poulies.

Quand le marteau est immobile au haut de sa course, il est prêt à écraser le fer et à produire ainsi du travail mécanique : il suffit de le laisser tomber. On dit qu'il possède de l'énergie : pour les mécaniciens et les électriciens, l'énergie est le pouvoir de produire du travail mécanique.

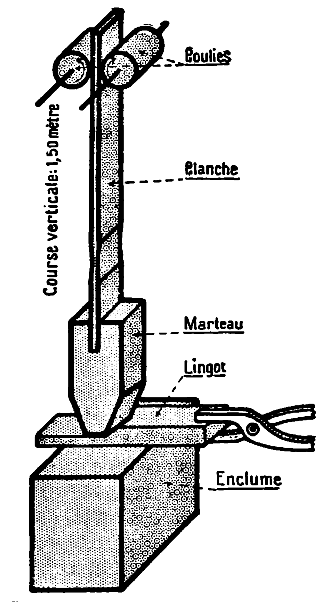


Fig. 1. — *Pilon à planche :* le marteau de 50 kilogrammes tombe de 1,50 mètre.

2. L'énergie mécanique peut exister sous deux formes : énergie potentielle et énergie cinétique.

L'énergie du marteau se transforme directement en travail par la chute qui est un phénomène mécanique : on la nomme pour cette raison ***énergie mécanique.***

Quand le marteau est au repos, en haut de sa course, l'énergie qu'il

possède est en attente d'être utilisée, en réserve : on lui donne le nom d'***énergie potentielle***[1].

Lorsque le marteau tombe, il acquiert une vitesse de plus en plus grande. Or, c'est au moment du choc, pendant que sa vitesse s'annule, que du travail utile est produit. Le marteau en mouvement possède donc de l'énergie à cause de sa vitesse : on l'appelle ***énergie cinétique*** (de *kinéma*, mouvement).

En résumé, dans le cas du pilon à planche :

pendant l'ascension, le *travail* fourni par le moteur électrique se transforme en *énergie potentielle;*

pendant la chute, cette énergie potentielle devient de l'*énergie cinétique;*

pendant le choc, l'énergie cinétique se transforme à son tour en *travail mécanique.*

L'énergie mécanique, potentielle ou cinétique, se mesure avec les mêmes unités que le travail mécanique: le kilogrammètre, le joule.

II. — Énergie calorifique.

3. La chaleur est une forme de l'énergie : c'est de l'énergie calorifique.

a) Dans les machines à vapeur, les moteurs à explosion, on produit de la chaleur pour obtenir du travail mécanique.

Inversement, le travail mécanique peut se transformer en chaleur. Par exemple, le frottement de l'outil dans les opérations de perçage, tournage, fraisage, absorbe du travail mécanique et produit de la chaleur. Une grande partie du travail fourni par les moteurs de l'atelier est ainsi transformée en chaleur.

Expériences. — Pliez et dépliez rapidement un fil de fer autour du même point. Constatez qu'il s'échauffe en ce point. De même si vous le tordez et le détordez.

Le travail mécanique que vous fournissez pour produire ces déformations se transforme en chaleur, en partie tout au moins.

La chaleur est donc de l'énergie : on la nomme *énergie calorifique.*

b) On sait que l'unité de quantité de chaleur est la ***calorie*** (symbole : ***cal***) : c'est la quantité de chaleur qu'il faut pour élever de 1 degré la température de 1 gramme d'eau[2].

On emploie souvent comme unité la *kilocalorie* (symbole *kcal*) qui vaut 1 000 calories.

1. Rapprocher cet adjectif des substantifs *potentat*, *impotent*.
Potentiel vient d'un mot latin *potens* qui signifie *puissance* dans le sens de *pouvoir faire*.

2. L'unité légale de quantité de chaleur est la THERMIE (*th*) — quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 *tonne* d'eau pour élever sa température de 1° : 1 *calorie* = 1 microthermie (1 µth).

c) Le physicien anglais Joule [1] a montré qu'il y a un rapport constant entre la quantité de travail transformée en chaleur et la quantité de chaleur produite.

Des expériences faites d'abord par Joule, et ensuite par beaucoup d'autres physiciens, il résulte *que* 1 *joule transformé en chaleur produit* 0,24 *calorie*.

Inversement, 1 calorie transformée complètement en travail donne 4,18 joules. On dit que ***l'équivalent mécanique de la calorie est 4,18 joules.***

III. — Énergie chimique.

4. L'énergie chimique est une troisième forme d'énergie.

Quand du charbon brûle en produisant du gaz carbonique, il se dégage 8 000 calories par gramme de charbon brûlé. Cette chaleur peut être dissipée autour du foyer et chauffer les alentours; mais elle peut aussi être utilisée dans une chaudière de machine à vapeur; elle produit alors de la vapeur, fait mouvoir le piston de la machine et, finalement, donne du travail mécanique.

L'ensemble *charbon-oxygène* est donc capable de travail. Il possède de l'énergie en réserve sous forme différente de l'énergie mécanique : on l'appelle l'*énergie chimique.*

Les mélanges explosifs, la poudre, la dynamite possèdent aussi de l'énergie chimique.

IV. — Énergie électrique.

5. L'énergie électrique est une quatrième forme d'énergie.

Un courant électrique peut, soit faire tourner un moteur, soit chauffer un radiateur, soit décomposer de l'eau acidulée dans un voltamètre.

Inversement on produit un courant électrique en dépensant ou du travail mécanique (dynamos), ou de la chaleur (piles thermo-électriques), ou de l'énergie chimique (piles et accumulateurs).

Il existe donc une forme particulière d'énergie : l'*énergie électrique*, remarquable par sa facilité de transformation.

V. — La conservation de l'énergie.

6. Voici un principe [2] fondamental : celui de la conservation de l'énergie.

1. *Joule* (1818-1889), physicien anglais, commença ses travaux sur la chaleur à Manchester, vers 1848. Voir lecture, p. 55.)

2. Un *principe* est, en physique, ce qu'un *axiome* est en mathématique : une vérité que l'on admet sans démonstration; elle est vérifiée, *a posteriori*, par l'exactitude des conséquences que l'on en déduit, conséquences qui peuvent être soumises au contrôle de l'expérience.

Chaque fois qu'il y a transformation d'une forme d'énergie dans une autre, l'énergie disparue et l'énergie produite sont en quantités rigoureusement équivalentes : *l'énergie se conserve en quantité.*

Par exemple, si l'on fournit 1 000 *kWh* d'énergie électrique à un moteur, une partie de cette énergie, 800 *kWh* par exemple, est transformée en énergie mécanique; le reste, soit 200 *kWh*, se transforme en chaleur qui échauffe le moteur et l'air ambiant. L'énergie fournie au moteur d'une part, l'énergie restituée par le moteur, d'autre part, sont en quantités égales.

7. Qu'appelle-t-on rendement d'un appareil ?

Remarquons que lorsqu'on fait fonctionner un moteur électrique, c'est pour obtenir de l'énergie mécanique. On considère donc l'énergie calorifique produite en même temps comme une perte. Dans l'exemple choisi, on dira que le moteur a un *rendement* [1] de 80 pour cent, parce que l'on n'obtient sous la forme utile que 80 pour cent de l'énergie fournie.

$$\textit{Rendement} = \frac{\textit{Energie utile}}{\textit{Energie fournie}}$$

Résumé.

1. — L'énergie est le pouvoir de fournir du travail.

2. — Elle existe sous diverses formes : mécanique (potentielle ou cinétique), calorifique, chimique, électrique.

3. — Les diverses formes d'énergie peuvent se transformer les unes dans les autres. Dans ces transformations, l'énergie se conserve en quantité.

Exercices.

1. Une kilocalorie équivaut à combien de kilogrammètres?
On sait qu'une calorie équivaut à 4,18 joules, et que 9,81 joules valent 1 kilogrammètre.

2. Montrer que 1 kilowatt-heure équivaut à 860 kilocalories.

3. Le *kWh* électrique coûte 0,28 NF. Le mètre cube de gaz d'éclairage produit en brûlant 4 000 kilocalories et coûte 0,5 NF. Calculer :
1° combien le *kWh* vaut de joules;
2° à combien de kilocalories équivalent ces joules, sachant qu'un joule équivaut à 0,24 calorie;
3° combien coûtent 1 000 kilocalories produites à partir de l'énergie électrique;

1. Le professeur insistera sur le sens de ce mot, car certains élèves gardent cette idée fausse que le rendement d'un moteur est le travail qu'il peut fournir.

4° combien coûtent 1 000 kilocalories provenant de la combustion du gaz d'éclairage. Conclure.

4. Dans le foyer de la chaudière d'une machine à vapeur, on brûle 800 *g* de charbon par cheval-heure produit par la machine. Un gramme de charbon, en brûlant, donne 8 000 calories.

Calculer :

1° combien un cheval-heure vaut de kilogrammètres;

2° à combien de calories équivaut un cheval-heure, sachant que 1 calorie équivaut à 0,426 *kgm*;

3° le nombre de calories dégagées dans le foyer par cheval-heure produit par la machine;

4° le rendement de la machine à vapeur, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie utile produite par la machine et l'énergie totale fournie dans le foyer.

5. Un lac de montagne alimente une chute d'eau qui fait tourner les turbines d'une usine génératrice de courant électrique, ou centrale électrique. Les turbines actionnent des dynamos qui produisent le courant.

Ce courant est utilisé dans des habitations et des usines où il sert à l'éclairage et à la commande de machines-outils.

Faites un tableau des formes successives prises par l'énergie mécanique potentielle de l'eau du lac.

6. Une chute d'eau a une puissance de 1 500 chevaux. Elle actionne une turbine qui fait tourner une dynamo. Le rendement de la turbine est de 80 %, celui de la dynamo 85 %. Quelle est la puissance de la dynamo en kilowatts?

7. Une dynamo de 1 000 kilowatts est commandée par une turbine hydraulique. Le rendement de la dynamo est de 82 %, celui de la turbine 75 %. Quelle est en chevaux la puissance de la chute?

L'eau tombe d'une hauteur moyenne de 50 mètres. Quel est le débit de la chute, c'est-à-dire le nombre de mètres cubes d'eau qui tombent pendant chaque seconde?

8. Un moteur à explosion consomme, par cheval-heure, 600 litres d'un gaz combustible dont le pouvoir calorifique est de 4 200 kilocalories par mètre cube.

Quel est le rendement du moteur?

9. Pour chauffer un appartement, on brûle en moyenne, chaque jour, 20 *kg* d'anthracite, de pouvoir calorifique 8 000 kilocalories par kilogramme, et coûtant 160 NF la tonne.

1° Quel est le prix de revient de l'heure de chauffage?

2° Quelle est la puissance du radiateur électrique capable de rendre le même service, sachant que 40 % de la chaleur provenant de la combustion de l'anthracite est emportée sans profit par les fumées, tandis que toute la chaleur produite par le radiateur électrique est utilisée dans l'appartement.

3° Quel est le prix de revient du chauffage électrique, sachant que le kilowatt-heure d'énergie électrique employé au chauffage est vendu 0,14 NF.

LECTURE

De grands progrès scientifiques sont dus à des amateurs.

« *C'est une coïncidence étrange que presque tout le travail fondamental se rapportant à la nature de la chaleur ait été accompli par des physiciens non professionnels, qui regardaient la physique simplement comme leur grand dada. Ce furent l'Ecossais* **Black**[1], *le médecin allemand* **Mayer**[2] *et le comte* **Rumford**[3], *le grand aventurier américain qui vécut ensuite en Europe et qui, parmi d'autres fonctions, remplit celle de ministre de la guerre en Bavière. Il y eut aussi le brasseur anglais* **Joule**[4], *qui, dans ses rares moments de loisir, fit quelques-unes des expériences les plus importantes concernant la conservation de l'énergie.*

« **Joule** *vérifia par l'expérience la conjecture que la chaleur est une forme de l'énergie et détermina le rapport des unités de chaleur et de travail mécanique.* »

A. Einstein[5] et L. Infeld.

1. *Black* (1729-1798), chimiste anglais à qui l'on doit notamment la découverte de la *chaleur latente.*

2. *Mayer* (1814-1878), médecin et physicien allemand, auteur de travaux importants sur l'équivalent mécanique de la calorie. C'est lui qui, en 1842, énonça de façon nette le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail. *Carnot,* fils de l'Organisateur de la Victoire, avait eu l'idée de ce principe dès 1830; mais ce qu'il a écrit sur cette question n'a été publié qu'en 1871.

3. *Rumford* (1753-1824), alors ministre de la guerre en Bavière, avait été frappé de la grande quantité de chaleur produite pendant le forage des canons. Avant lui, on expliquait ce dégagement de chaleur en admettant que la chaleur spécifique des copeaux est plus faible que celle du bloc de bronze primitif. Rumford réduisit cette explication à néant en montrant que ces chaleurs spécifiques sont égales. Et il expliqua le dégagement de chaleur en admettant que le travail mécanique peut créer de la chaleur. Il fit même des mesures pour mesurer l'équivalent mécanique de la calorie mais il trouva un nombre beaucoup trop fort (570 *kgm* pour 1 *kilocalorie*). Il avait d'ailleurs fait remarquer lui-même que ses expériences étaient peu précises.

4. *Joule* (1818-1869), voir lecture page 70.

5. *Einstein,* savant physicien, né à Ulm en 1879, mort aux États-Unis en 1955. Il s'est illustré par son œuvre de physique mathématique.

2. — COURANT ÉLECTRIQUE PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

4e LEÇON

Les caractères généraux du courant électrique.

1. Expériences montrant les principaux effets du courant électrique.

Nous disposons des appareils suivants (fig. 1) :

1° une batterie d'accumulateurs (deux éléments au moins);

2° un fil *fin* de fer ou de ferro-nickel enroulé en spirale et fixé entre deux bornes (longueur : 0,30 *m*, diamètre : 0,2 *mm* ou moins);

3° un vase contenant une solution de sulfate de cuivre (SO_4Cu), dans laquelle plongent deux plaques de cuivre (l'appareil se nomme un *voltamètre*);

4° une aiguille aimantée sur pivot.

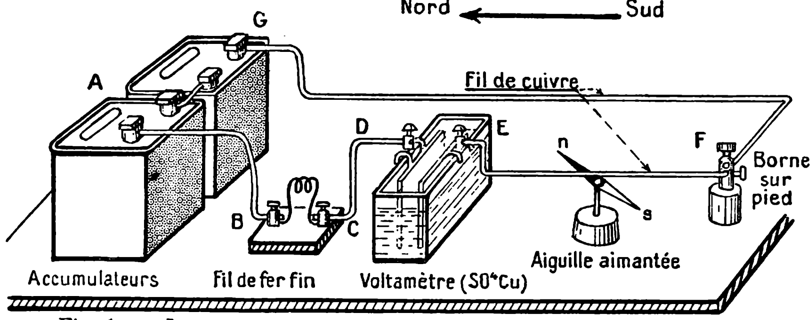


Fig. 1. — Le courant électrique se manifeste par des effets calorifiques, chimiques et magnétiques.

Avec des fils de cuivre, nous réunissons la borne A de la batterie à la borne B du fil de fer, la borne C du fil à la borne D du voltamètre, la borne E à la borne F et celle-ci à la borne G des accumulateurs. Le fil EF est tendu au-dessus, dans la direction et très près de l'aiguille aimantée.

Nous observons :

1° que le fil de fer rougit, décelant ainsi un dégagement de chaleur;

2° qu'une boue rougeâtre de cuivre se dépose sur l'une des plaques du voltamètre, alors que l'autre plaque se dissout dans le liquide;

3° que l'aiguille aimantée dévie et se met en croix avec le fil qui la surmonte.

Il s'est produit à la fois des *phénomènes calorifiques*, des *phénomènes chimiques*, des *phénomènes magnétiques*.

On dit que dans le fil de cuivre et les appareils circule un courant électrique.

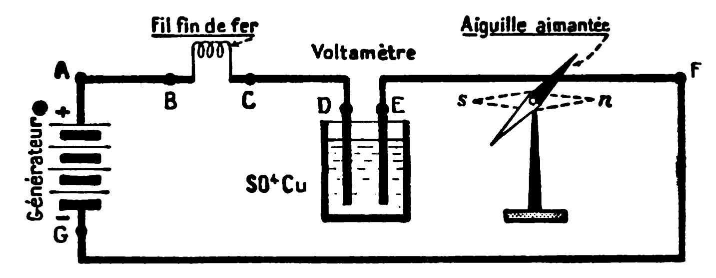


Fig. 2. — Cette figure représente d'une façon simplifiée les appareils de la figure 1 : c'est un *schéma*. L'ensemble de tous ces appareils et des fils conducteurs constitue un *circuit électrique*.

Les expressions :

*le courant électrique **échauffe** les corps qu'il **traverse**;*

*le courant produit des décompositions **chimiques**;*

le courant dévie l'aiguille aimantée,

énoncent les faits que nous avons constatés, mais ne les expliquent pas.

On dit encore : la batterie d'accumulateurs est un *générateur de courant électrique*; le fil incandescent, *un récepteur calorifique*; le voltamètre, *un récepteur électrochimique*; le système fil et aiguille aimantée, *un récepteur magnétique*.

Vous apprendrez, en classe de TI, qu'un courant électrique dans un fil métallique est un déplacement de particules d'électricité, appelées ***électrons***, qui circulent entre les atomes du métal.

2. Il y a des corps bons conducteurs et des corps mauvais conducteurs de l'électricité.

Le fil de cuivre qui conduit le courant dans l'expérience précédente peut être remplacé par un fil d'autre métal : fer, aluminium, plomb, etc.; les phénomènes constatés au § 1 se produisent encore : tous les métaux sont *bons conducteurs.*

Mais un fil de caoutchouc ou de chanvre est mis à la place du cuivre, les phénomènes calorifiques, chimiques et magnétiques sont supprimés; il n'y a plus de courant : caoutchouc et chanvre sont de *mauvais conducteurs,* des *isolants.*

Si l'on remplace le sulfate de cuivre par l'eau distillée le courant ne passe plus : l'eau pure est *mauvaise conductrice.*

Par contre, les dissolutions dans l'eau d'acides, de bases, de sels, sont de *bons conducteurs.*

Tous les gaz sont *mauvais conducteurs.*

3. Qu'appelle-t-on circuit électrique?

Pour qu'il y ait courant, il faut que les deux bornes d'un *générateur* soient réunies par une suite *ininterrompue* de corps *conducteurs.* En étudiant plus tard les générateurs, nous verrons que les courants qu'ils fournissent les traversent aussi d'une borne à l'autre. *L'ensemble du générateur, des récepteurs et des conducteurs constitue **un circuit électrique.***

Remarquons que les phénomènes qui caractérisent le courant électrique se produisent non seulement ***dans les conducteurs*** du circuit (phénomènes calorifiques et chimiques), mais encore dans l'espace ***autour des conducteurs*** (phénomènes magnétiques).

4. Les interrupteurs permettent d'interrompre et de rétablir à volonté le courant électrique dans un circuit.

Pour interrompre et rétablir le courant à volonté, il est commode d'intercaler dans le *circuit* une petite barre de cuivre ou de laiton que l'on peut enlever ou replacer facilement : c'est un *interrupteur.*

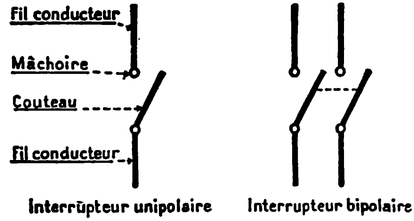


Fig. 3. — Schémas d'interrupteurs.

Certains interrupteurs coupent le circuit à un seul endroit : ils sont *unipolaires*; d'autres le coupent sur les deux fils qui le conduisent au même appareil : ils sont *bipolaires* (fig. 3).

Résumé.

1. **Un fil métallique reliant les deux bornes d'un accumulateur est parcouru par un** ***courant électrique.***

Ce courant se manifeste par des ***effets calorifiques*****, des** ***effets chimiques*****, des** ***effets magnétiques.***

2. **Les métaux conduisent le courant, ce sont des** ***conducteurs.***

Le caoutchouc, le bois, le coton, la soie ne conduisent pas le courant : ce sont des ***isolants.***

3. **Pour qu'un courant se produise, il faut qu'il y ait une suite ininterrompue de conducteurs entre les bornes d'un générateur. On supprime un courant en coupant le circuit électrique avec un interrupteur (unipolaire ou bipolaire).**

Exercices.

1. Citer des appareils usuels où l'on utilise les propriétés calorifiques du courant électrique.

2. Citer des expériences faites dans le cours de chimie où l'on a utilisé les propriétés chimiques du courant électrique.

3. Les fils électriques aériens ne sont pas entourés d'une gaine isolante; ils reposent sur des isolateurs en porcelaine ou en verre.

Que pouvez-vous en conclure relativement à la conductibilité de l'air et de la porcelaine pour l'électricité?

4. Décortiquez un bout de fil électrique pour installation d'éclairage. Notez les divers matériaux dont il est fait; justifiez leur choix.

Représentez la section du fil à l'échelle de 10 pour 1.

5. Examiner un interrupteur et en faire le croquis.

Dire de quelle matière chaque partie est faite; et justifier le choix de cette matière sachant que les corps bons conducteurs de l'électricité comprennent seulement :

a) les métaux et leurs alliages (solides ou liquides);

b) les acides, bases, sels (fondus ou dissous dans l'eau).

Sens d'un courant électrique.

1. Expérience.

Recommençons le montage d'appareils fait dans la leçon précédente : batterie d'accumulateurs, fil de fer fin, vase à sulfate de cuivre, aiguille aimantée, en y ajoutant un interrupteur (fig. 1).

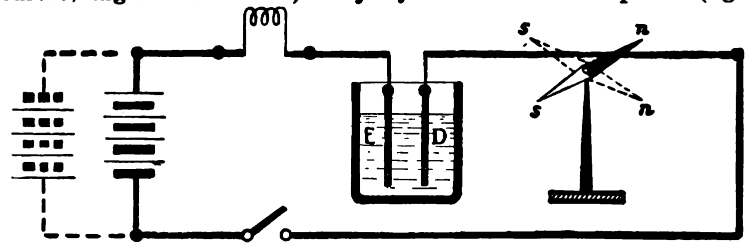


Fig. 1. — Lorsqu'on inverse, aux bornes du générateur, les connexions du circuit extérieur, les effets chimiques et magnétiques s'inversent; les effets calorifiques ne changent pas.

1° Fermons le circuit. Repérons la plaque sur laquelle se dépose du cuivre, D par exemple, et notons le sens de déviation de la pointe nord de l'aiguille aimantée.

2° Intervertissons les connexions des conducteurs avec les bornes de la batterie . le fil de fer rougit de la même façon; mais, dans le vase à sulfate de cuivre, le cuivre ne se dépose plus en D mais en E; et l'aiguille aimantée dévie en sens *contraire*.

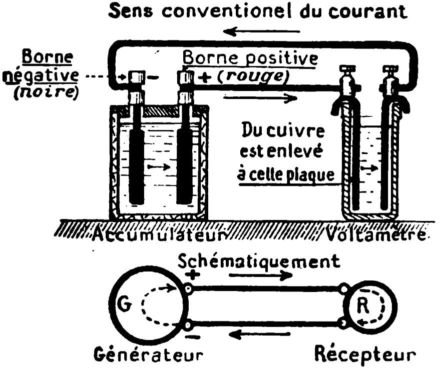


Fig. 2. — *Par convention*, le courant va du pôle positif au pôle négatif *à l'extérieur* du générateur.

2. Les deux bornes d'une batterie d'accumulateurs ne sont pas identiques.

Des constatations qui viennent d'être faites, il résulte que les deux bornes du générateur ont

des propriétés différentes. Pour les distinguer, on *convient* de peindre en *rouge* (fig. 2) la borne reliée par un fil à la plaque qui se ronge dans le voltamètre à sulfat de cuivre, de peindre en *noir* celle qui est connectée à la plaque sur laquelle se dépose du cuivre.

On *convient*, en outre, d'appeler *borne positive* ou *pôle positif*, la borne rouge (souvent marquée du signe +), *borne négative* ou *pôle négatif* la borne noire (souvent marquée du signe —).

Ce repérage, qui est tout à fait conventionnel, est admis par tous les électriciens.

3. Par convention on attribue un sens au courant électrique.

Parce que les phénomènes chimiques sont différents pour les deux extrémités de fil conducteur plongeant dans le sulfate de cuivre, on dit, que les effets chimiques du courant sont *polarisés*.

Il en est de même des effets magnétiques. L'effet calorifique ne l'est pas.

On est ainsi conduit à donner un sens au courant électrique. ***Par convention, le courant va du pôle positif au pôle négatif dans le circuit extérieur au générateur.***

Dans le générateur, il va du pôle négatif au pôle positif.

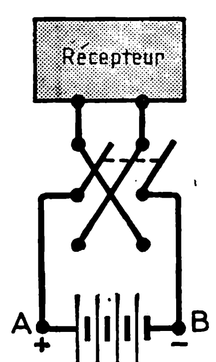


Fig. 3. — Suivez le sens du courant en partant de A :

1° Quand les couteaux sont enclenchés en haut;

2° quand ils sont enclenchés en bas.

L'appareil inverse le sens du courant dans le récepteur. C'est un **commutateur inverseur.**

4. Commutateur-inverseur.

C'est une sorte d'interrupteur bipolaire avec lequel on change commodément le sens du courant dans une portion de circuit électrique. Le modèle à deux couteaux et quatre mâchoires réunies deux à deux, dont le schéma est ci-contre, est très employé (fig. 3).

5. Papier cherche-pôle.

Mélangeons une solution dans l'eau de chlorure de sodium avec une solution de ferrocyanure de potassium[1]. Avec le liquide, imbibons une feuille de papier buvard blanc. Après l'avoir essorée, plaçons la feuille humide sur une plaque de zinc (fig. 4). Faisons glisser sur le papier deux pointes émoussées *en fer* reliées aux deux bornes d'une batterie d'accumulateurs.

L'une des pointes trace sur le papier un ***trait bleu***[2], le chemin suivi par l'autre pointe n'est pas colorée. *La pointe qui fournit le trait bleu est connecté à la borne positive du générateur.*

1. C'est un sel dont les cristaux ressemblent à des morceaux de corne et que les forgerons emploient pour cémenter le fer superficiellement.

2. Le courant décompose le chlorure de sodium. Le chlore attaque l'une des pointes de fer et y produit du chlorure ferrique qui, avec le ferrocyanure, donne du bleu de Prusse.

6. La plupart des secteurs électriques distribuent du courant alternatif.

Proposons-nous de repérer, avec le papier cherche-pôle que nous avons fabriqué, la polarité des alvéoles de la prise de courant alimentée par le secteur.

Nous obtenons deux lignes de tirets bleus. Les tirets sont séparés par des intervalles non colorés (fig. 4). A un tiret d'une ligne correspond un intervalle de l'autre.

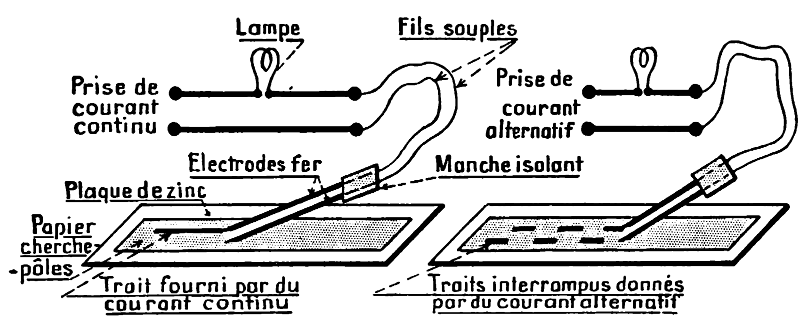


Fig. 4. — Expérience avec du **courant continu** à gauche, du **courant alternatif** à droite.

Donc chaque pointe est alternativement positive et négative. Si l'on avait déplacé les pointes de fer sur le papier pendant exactement une seconde, en comptant le nombre de tirets d'une ligne on en trouverait 50. Le courant du secteur passe donc pendant une seconde 50 fois dans un sens et 50 fois en sens contraire. On le nomme ***courant alternatif à 50 périodes par seconde.***

La prise de courant n'est pas polarisée.

Le courant fourni par la batterie d'accumulateurs a toujours le même sens : c'est ***un courant continu.***

Résumé.

1. — **Les actions chimiques et magnétiques du courant électrique sont polarisées. Il en résulte que les deux bornes d'un générateur doivent être distinguées l'une de l'autre. L'une est *positive*, l'autre est *négative*.**

2. — **On repère ces pôles avec du papier cherche-pôles ou une aiguille aimantée.**

3. — **On convient de dire que le courant électrique va du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur qui relie à l'extérieur les pôles du générateur.**

4. — **Un *courant alternatif* est un courant dont le sens varie. Le secteur fournit, en général, un courant alternatif.**

Intensité d'un courant.

I. — Forces électrodynamiques. — Définition de l'Ampère.

1. **Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont de même sens, se repoussent s'ils sont de sens contraire.**

Voici deux bobines rectangulaires d'une vingtaine de spires chacune (fig. 1). Pour que le côté BC de la bobine 1 soit très mobile, cette bobine est suspendue en A par l'un des fils longs et fins qui l'alimentent en courant; l'autre est laissé flottant pour ne pas gêner la rotation de la bobine.

Deux conducteurs relient ces fils aux bornes d'une batterie de trois éléments d'accumulateurs. Remarquez que le courant passe dans le même sens dans tous les brins formant un côté de la bobine, par exemple de B en C dans le côté vertical BC.

La bobine 2 est tenue à la main. Elle est connectée aussi à la batterie. Le courant va de D en E.

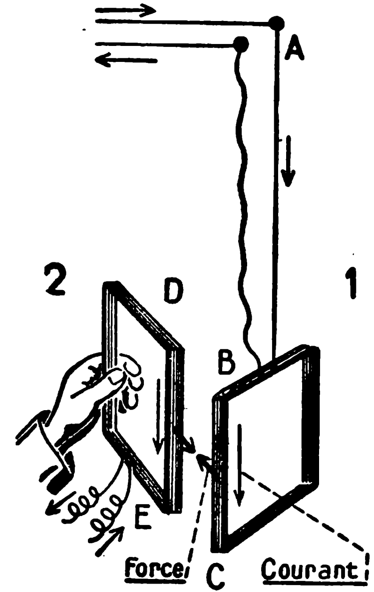


Fig. 1. — Forces électrodynamiques. Les courants sont parallèles et de même sens dans les brins BC et DE des bobines; la bobine 1 tourne et BC se rapproche de DE.

Approchons le côté DE de BC, ***ils s'attirent;*** or, les courants sont à peu près parallèles et ont le même sens.

Retournons la bobine 2. Approchons ED de BC; les deux côtés ***se repoussent;*** les courants qui les parcourent sont parallèles et de sens contraires.

Nous avons montré qu'entre deux courants parallèles s'exerce une

force, que l'on qualifie d'***électrodynamique***, et constaté que cette force est faible.

2. De quels facteurs dépend la force électrodynamique exercée l'un sur l'autre par deux courants parallèles?

Considérons le cas simple d'un conducteur A extrêmement long et d'un autre B qui lui est parallèle et de longueur L (fig. 2). La force F exercée par A sur B est égale et opposée à la force exercée par B sur A : c'est la loi de l'*égalité de l'action et de la réaction*, étudiée en mécanique.

La force électrodynamique F dépend :
de la distance *d* des deux courants;
de la longueur L du courant B;
des courants eux-mêmes.

On peut la mesurer. Nous ne ferons pas cette mesure; nous en indiquerons seulement les résultats.

a) Si la force d'attraction entre deux courants parallèles et de même sens est F et que l'on inverse le sens de l'un d'eux, tout autre condition restant inchangée, ***la force de répulsion a la même valeur F.***

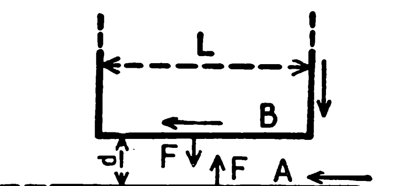


Fig. 2. — L'attraction entre les deux courants, parallèles et de même sens, dont l'un A est extrêmement long, est proportionnelle à la longueur L du courant B et inversement proportionnelle à la distance *d* des deux courants.

b) Quand on fait varier la distance *d* entre deux courants parallèles, ***la force électrodynamique est inversement proportionnelle à d;*** elle est double quand la distance est réduite à *d* : 2; elle est 4 fois plus petite quand la distance est 4 *d*, etc.

c) Si l'on fait varier la longueur L du courant B, sans rien changer d'autre dans le circuit, ***la force électrodynamique varie proportionnellement à L.***

d) En modifiant le circuit électrique auquel appartient la portion de courant B, par exemple en mettant plus ou moins d'éléments d'accumulateurs en circuit quand le générateur est une batterie, la grandeur de la force F qui s'exerce entre les deux courants B et A change.

Si elle est plus grande, on dit que ***le courant B est devenu plus intense;*** si elle est plus faible, le courant est moins intense.

L'action électrodynamique entre deux courants parallèles conduit donc à la notion d'***intensité d'un courant.***

3. Par convention, l'intensité d'un courant est proportionnelle aux forces électrodynamiques qu'il exerce.

Si un courant B exerce, dans les mêmes conditions, une force électro-

dynamique 2, 3, 4... *n* fois plus grande qu'un autre courant B′, l'intensité de B est 2, 3, 4... *n* fois plus grande que celle de B′, *par convention.*

Il est donc possible, en mesurant les forces électrodynamiques, de comparer les intensités des courants électriques à celle d'un courant choisie pour unité.

4. L'unité d'intensité est appelée ampère[1] (symbole A).

***L'ampère** est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre, dans le vide, produirait entre ces deux conducteurs une force égale à deux dix-millionièmes de newton par mètre de longueur* (fig. 3).

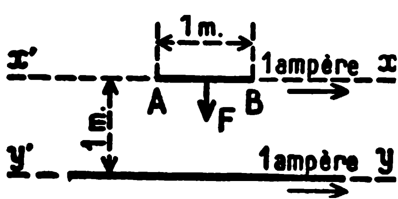


Fig. 3. — **Définition de l'ampère.** La force électrodynamique F qui s'exerce sur une longueur de 1 *mètre* de l'un des conducteurs est égale à 2 dix-millionièmes de *newton* lorsque les deux conducteurs sont distants de 1 *mètre* et que l'intensité du courant est 1 *ampère* dans chaque conducteur.

Une force de deux dix-millionièmes de newton est très faible, environ 2/100 du poids de 1 milligramme. Pourtant l'ampère est une unité d'un ordre de grandeur usuel : l'intensité du courant dans une lampe à incandescence ordinaire est d'environ 0,5 *ampère*, dans un moteur de moyenne puissance elle est de quelques dizaines d'*ampères*, dans un récepteur téléphonique, elle s'évalue en *milliampères*.

2. — Électrodynamomètre-Balance.

5. Un électrodynamomètre-balance permet, par une pesée, de mesurer avec une extrême précision l'intensité d'un courant en ampères.

Un électrodynamomètre est, par exemple, composé de 4 bobines fixes B, C, B′, C′, et de 2 bobines mobiles A et A′ suspendues aux plateaux d'une balance de précision (fig. 4).

Le courant à mesurer circule dans toutes ces bobines, dans des sens tels que toutes les forces électrodynamiques entre bobines fixes et bobines mobiles tendent à incliner le fléau du même côté, vers la droite par exemple.

1. Nom choisi en hommage à Ampère, illustre savant français (1775-1836).

On rétablit **l'équilibre de la balance avec des masses** marquées mises dans l'un des plateaux, soit **25,738** ***grammes***, **par** exemple, le **poids de ces** masses.

Les bobines ont été construites avec grand soin; **la longueur du fil de chacune d'elles est connue aussi exactement que possible, les distances des spires ont été mesurées avec une grande précision. Bref,** à l'aide de **ces données** et de la définition **légale de l'ampère, d'une part, du résultat de la pesée (25,738** ***g*****), d'autre part, on peut calculer l'intensité I du courant qui passe dans les bobines : soit, par exemple, 1,216 4** ***ampère*****.**

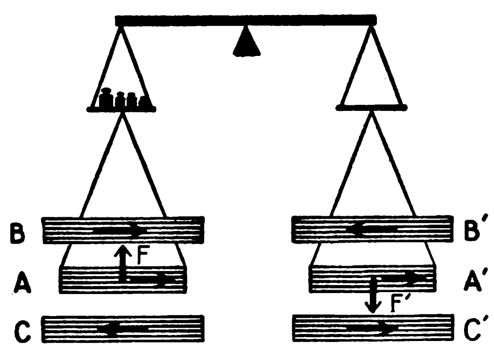


Fig. 4. — **Schéma très simplifié d'un électrodynamomètre-balance. B, C, B', C', bobines fixes; A, A' bobines mobiles suspendues aux plateaux d'une balance de précision. Le courant à mesurer passe dans toutes les bobines; les conducteurs qui amènent ces courants ne sont pas représentés. Les flèches horizontales indiquent le sens des courants Les flèches verticales représentent les forces électrodynamiques qui agissent sur les bobines suspendues.**

6. Les électriciens emploient des ampèremètres pour mesurer les intensités des courants.

Les électrodynamomètres-balances sont des appareils de construction difficile et très coûteux, encombrants et intransportables. Ils sont réservés aux grands laboratoires nationaux de mesures. Ils servent à obtenir l'ampère légal dont il est impossible de fabriquer un étalon matériel, comme ceux du mètre ou du kilogramme.

On les emploie à vérifier des électrodynamomètres, plus simples et moins précis, qui suffisent, dans les laboratoires industriels, pour graduer des appareils nommés ***ampèremètres*****, utilisés par les électriciens pour mesurer les intensités des courants.**

Résumé.

1. — Un courant est plus ou moins intense selon qu'il attire plus ou moins un courant qui lui est parallèle.

2. — L'intensité d'un courant s'évalue en ***ampères*****.**

L'ampère est l'intensité d'un courant qui attire un courant parallèle identique, placé à 1 ***mètre*** **de distance, avec une force de** ***2 dix-millionièmes de newton*** **par mètre de conducteur.**

Notes complémentaires.

1. ***Définition de l'ampère.*** — Autrefois on définissait *l'ampère* en se référant à la décomposition par le courant électrique du nitrate d'argent (NO_3Ag) dissous dans l'eau.

Cette décomposition s'effectue avec dépôt d'argent sur une plaque métallique connectée au pôle négatif du générateur de courant.

La définition était la suivante : l'ampère est l'intensité d'un courant qui dépose pendant chaque seconde 1,118 *milligramme* d'argent par décomposition d'une solution dans l'eau de nitrate d'argent.

Une mesure d'intensité d'après cette définition exigeait plusieurs minutes de passage du courant supposé invariable dans la solution à décomposer. Or, il est difficile de maintenir une intensité rigoureusement constante pendant quelques minutes. En réalité, on mesurait l'intensité moyenne pendant l'expérience et l'intensité à un instant déterminé n'était connue qu'avec une précision incertaine.

C'est pourquoi on a remplacé la définition *électrochimique* de l'ampère par une définition *électrodynamique.*

Cette définition paraît un peu compliquée. Vous comprenez qu'il fallait y préciser la longueur et la position l'un par rapport à l'autre des deux conducteurs parcourus par le courant.

2. ***Rappel de la définition du newton.*** — Le newton est la force qui, agissant sur une masse de 1 *kilogramme* lui imprime une accélération de 1 *mètre par seconde par seconde.*

Vous savez, d'après l'étude de la chute libre des corps, qu'une *force de* 1 *kilogramme-force* donne à une *masse de* 1 *kilogramme* une *accélération de* 9,81 *mètres par seconde par seconde.*

Pour donner à une masse de 1 *kilogramme*, une accélération de 1 *mètre par seconde par seconde,* il suffit d'une force de 1 : 9,81 *kilogramme-force.*

C'est la valeur du newton en kilogrammes-force : 1 : 9,81 = 0,102 soit environ 0,1.

Il en résulte que

2 *dix-millionièmes de newton* $\simeq$ 2 *centièmes de milligramme-force.*

3. ***Force électrodynamique s'exerçant entre deux courants parallèles.*** — Rappelons que la force F exercée par un courant rectiligne fort long et d'intensité I, sur un courant qui lui est parallèle, de longueur L et d'intensité I' située à une distance d, est :

1° proportionnelle à L;
2° — à I;
3° — à I';
4° inversement proportionnelle à d.

Donc,
$$F = k\frac{LII'}{d} \qquad (1)$$

k étant un coefficient constant qui dépend des unités employées.

Dans le cas qui correspond à la *définition de l'ampère :*

$$F = 0{,}02\ mgf, \quad L = 1\ m, \quad I = I' = 1A, \quad d = 1\ m.$$

Remplaçons les lettres par les valeurs dans la formule (1); on en tire :

$$0{,}02 = k\frac{1 \times 1 \times 1}{1} = k.$$

Et, par suite :

$$\underset{\text{milligramme-force}}{F} = 0{,}02 \; \frac{\overset{\text{mètre}}{L} \cdot \overset{\text{ampère}}{I} \cdot \overset{\text{ampère}}{I'}}{\underset{\text{mètre}}{d}}$$

4. *Écriture abrégée des puissances de 10.*

Il est peu commode d'écrire des nombres formés du chiffre 1 suivi ou précédé de beaucoup de *zéros* et l'on risque de commettre des erreurs. On obtient une écriture plus claire, plus rapide et plus sûre en utilisant les deux procédés suivants :

1° un nombre tel que 10 000 000 s'écrit 10^7 (10 puissance 7), l'exposant indique le nombre de *zéros* qui suivent le 1;

2° un nombre tel que 0,000 1 s'écrit 10^{-4} (10 puissance moins 4), l'exposant indique le rang du chiffre 1 après la virgule.

Les deux procédés s'appliquent aussi à un groupe de chiffres significatifs suivi ou précédé de *zéros*. Par exemple, le nombre 20 700 000 s'écrit $20{,}7 \, . \, 10^6$, le nombre 0,000 008 4 s'écrit $84 \, . \, 10^{-7}$.

Exercices.

1. Calculer la force qui s'exerce entre deux conducteurs parallèles, longs de 50 *mètres*, distants de 30 *centimètres*, parcourus en sens contraires par des courants de 90 ampères.

2. La *dyne* est une force qui donne à une masse de 1 *gramme*, une accélération de 1 *centimètre par seconde, par seconde*. Combien le kilogramme-force vaut-il de dynes?

3. Écrivez les nombres suivants :
mille milliards, 25 millions, 350 millionièmes, un dix-milliardième;
a) à la manière ordinaire;
b) en utilisant les puissances de 10.

4. Écrivez à la manière ordinaire : $4 \, . \, 10^3$; $9{,}81 \, . \, 10^7$; $5 \, . \, 10^{-5}$; $2 \, . \, 10^{-10}$.

Mesure pratique de l'intensité d'un courant : ampèremètres. Quantité d'électricité : ampère-heure.

I. — Ampèremètres.

1. Les intensités des courants se mesurent pratiquement avec des ampèremètres.

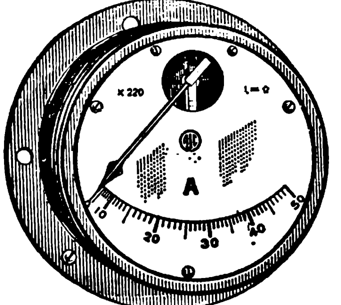


Fig. 1. — **Ampèremètre.** Cet appareil donne, par lecture directe de l'aiguille sur le cadran, l'intensité du courant qui le traverse.

Les *ampèremètres* sont des appareils portatifs, à lecture directe, c'est-à-dire qu'on lit l'intensité à mesurer sur un cadran, comme on lit l'heure sur une horloge ou une montre (fig. 1).

Ils fonctionnent en utilisant soit les effets calorifiques, soit les propriétés magnétiques des courants.

2. Voici trois types d'ampèremètres usuels.

a) ***Ampèremètres thermiques.*** — Un fil fin de bronze fixé à ses extrémités A et B (fig. 2) est traversé par la totalité ou par une fraction connue du courant à mesurer.

Un autre fil, très flexible, attaché en C, passe dans la gorge d'une petite poulie; il est tiré par un ressort *r*.

Le courant échauffe le fil AB qui s'allonge. Le fil flexible, tendu par le ressort, amène le point C en C', et, en même temps, fait tourner la poulie qui porte une aiguille indicatrice.

L'allongement du fil chaud est d'autant plus grand que le courant est plus intense. Il se traduit par un déplacement de la pointe de l'aiguille devant le cadran gradué en ampères.

Parce qu'ils sont fragiles, les ampèremètres thermiques sont moins employés que les autres.

b) ***Ampèremètres ferromagnétiques.*** — **On les nomme aussi** *ampèremètres à fer doux*[1] ou *électromagnétiques.*

Le courant parcourt les spires (à gros fil) d'une bobine dans laquelle

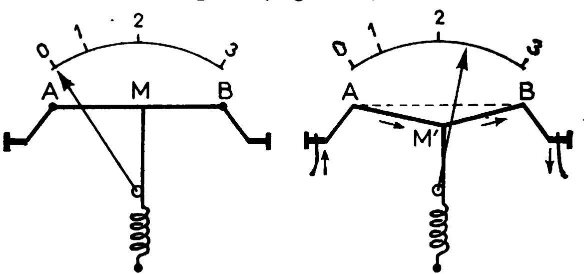


Fig. 2. — **Ampèremètre thermique.** A droite, le fil AB traversé par le courant s'est échauffé et par suite allongé; l'aiguille s'est déplacée devant l'échelle de l'appareil : l'intensité du courant est 2,3 ampères.

sont deux palettes de fer doux : l'une F fixe, l'autre F′ mobile parce que fixée à un axe tournant entre deux pivots. L'axe porte une aiguille qui se déplace devant un arc gradué (fig. 3). Un ou deux ressorts spiraux rappellent l'axe et l'aiguille vers leur position de départ.

Le courant qui passe dans la bobine aimante les palettes de la même façon : pôles nord en avant, par exemple, pôles sud à l'autre bout; elles se repoussent d'autant plus fortement que le courant est plus intense. La palette mobile entraîne l'axe et l'aiguille dont la déviation est limitée par la torsion des spiraux; la position d'arrêt dépend donc de l'intensité du courant[1].

L'arc est gradué en *ampères.*

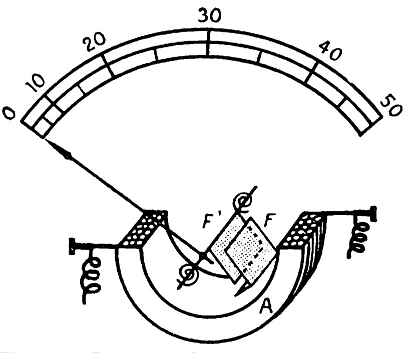


Fig. 3. — **Ampèremètre ferromagnétique.** La bobine est supposée coupée par le milieu pour laisser voir les deux palettes de fer doux F et F′ qui se repoussent parce qu'elles s'aimantent de la même façon quand le courant passe.

c) ***Ampèremètres à cadre mobile et aimant*[1] *ou magnétoélectriques.*** — Entre les pôles N et S d'un aimant fixe circulaire, est placée une petite bobine ou cadre montée sur pivots (fig. 4).

Deux ressorts spiraux amènent le courant au cadre. Ils ont aussi pour rôle de s'opposer à la rotation du cadre et de tendre à le ramener, quand

1. Ces appareils seront étudiés plus complètement aux 47e et 48e leçons.

il dévie, à une position fixe, dite de *zéro*. Une aiguille portée par le cadre et tournant avec lui se déplace devant une graduation.

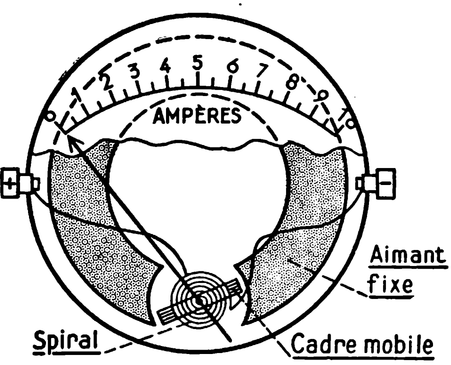


Fig. 4. — Ampèremètre à cadre mobile et aimant, dit magnétoélectrique.

Vous savez qu'un courant dévie un aimant mobile placé dans son voisinage (4e Leçon, § 1). Inversement, un aimant fixe fait dévier un courant mobile et tend à le mettre en croix avec la droite joignant les pôles.

Quand le cadre mobile de l'ampèremètre est parcouru par un courant, il tourne en entraînant l'aiguille. Sa rotation est limitée par la torsion des spiraux. Sa pointe s'arrête d'autant plus loin du zéro que le courant est plus intense.

La graduation est faite en *ampères* comme sur les appareils précédents.

3. Les ampèremètres à cadre mobile et aimant sont polarisés, les autres ne le sont pas.

Expérience. — Relions par des conducteurs un ampèremètre thermique, un ampèremètre électromagnétique et un ampèremètre à cadre mobile et aimant, de manière que le courant traverse successivement les trois appareils, qui sont ainsi ***montés en série*** (fig. 5).

Faisons passer un courant dans l'ensemble, de sens convenable pour que les aiguilles des trois appareils dévient dans le sens de la graduation, en général de la gauche vers la droite.

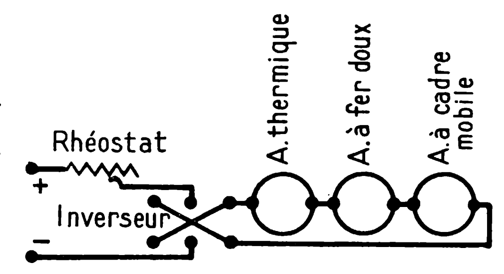


Fig. 5. — L'ampèremètre à cadre mobile est **polarisé**, les autres ne le sont pas.

Puis, inversons le sens du courant. La déviation conserve le *même sens dans les ampèremètres thermique et ferromagnétique.* L'aiguille de l'*ampèremètre à cadre mobile et aimant fixe* tend à dévier en *sens contraire;* elle en est empêchée par le boîtier de l'appareil.

L'ampèremètre à cadre mobile et aimant ne fonctionne donc que pour

un sens déterminé du courant : il est ***polarisé.*** Ses deux bornes sont marquées l'une +, l'autre —.

Les ampèremètres thermique et ferromagnétique ne sont pas polarisés.

4. Graduation d'un ampèremètre.

Elle est faite par comparaison avec un ampèremètre spécial, de construction très soignée et en parfait état, que l'on nomme ***ampèremètre étalon.***

Dans un circuit électrique on dispose en série (fig. 6) : un générateur représenté seulement par ses pôles + et —), un rhéostat, qui sert à régler l'intensité du courant, un ampèremètre étalon, un (ou plusieurs), ampèremètre à graduer.

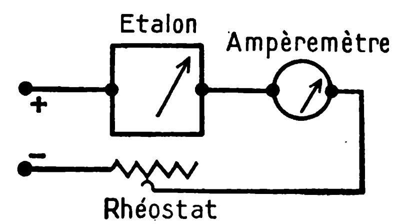


Fig. 6. — On gradue ou on vérifie un ampèremètre en le comparant à un ampèremètre étalon.

Le courant est réglé à 1 ampère, mesuré à l'ampèremètre étalon; on marque 1 en face de la pointe de l'aiguille de l'ampèremètre à graduer. De même pour les points principaux de la graduation.

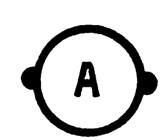


Fig. 7. — Symbole d'un ampèremètre dans les schémas électriques.

Périodiquement, l'ampèremètre étalon est comparé à un électrodynamomètre. En somme, tous les ampèremètres sont gradués, en passant par un plus ou moins grand nombre d'intermédiaires, par comparaison avec l'électrodynamomètre-balance étalon du Laboratoire Central d'Électricité.

Dans les schémas d'installations électriques, les ampèremètres sont représentés par le symbole figure 7.

II. — Propriété importante de l'intensité d'un courant.

5. L'intensité d'un courant est la même en tous les points d'un circuit sans bifurcation.

Expérience. — Nous montons comme l'indique la figure 8
une batterie de trois éléments d'accumulateurs;
deux ampèremètres gradués de 0 à 5 ampères;
un récepteur consistant en un fil de fer (longueur, 0,40 *mètre*, diamètre 0,2 *millimètre*) enroulé en boudin et monté entre deux bornes.

Le courant traverse d'abord l'ampèremètre 1, puis le récepteur, ensuite l'ampèremètre 2,

Les deux ampèremètres indiquant la même intensité, 2,4 ampères par exemple.

Donc, ***l'intensité est la même en tous les points d'un circuit sans bifurcation.***

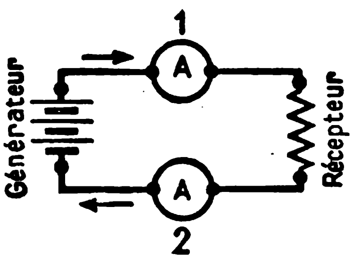


Fig. 8. — **L'intensité d'un courant** a la même valeur en 1 **avant**, et en 2 **après** le récepteur.

Cette loi est très importante :

a) elle montre qu'***un récepteur électrique ne diminue pas l'intensité du courant qui le traverse,*** pas plus qu'une roue de moulin ou une turbine hydraulique installée sur un cours d'eau n'use une partie de l'eau qu'elle reçoit; le ***débit*** du cours d'eau est le même en *amont* et en *aval* de la machine;

b) pour mesurer l'intensité d'un courant dans un récepteur, ***l'ampèremètre peut être placé en un point quelconque du circuit.***

6. Quand un courant se partage dans plusieurs dérivations, l'intensité du courant total est la somme des intensités des courants dérivés.

Expérience. — En plus du matériel de l'expérience précédente, nous utilisons un second récepteur calorifique (fil de fer : $l = 0,60$ *m*. $d = 0,2$ *mm*) et un troisième ampèremètre.

Les appareils sont montés comme l'indique la figure 9.

Le courant venant de la borne + du générateur traverse l'ampèremètre 1, puis se partage en B : une partie passe dans l'ampèremètre 2 et le récepteur R, une autre partie dans l'ampèremètre 3 et le récepteur R'; puis, en C, les deux courants se réunissent et reviennent par le même conducteur à la borne — du générateur.

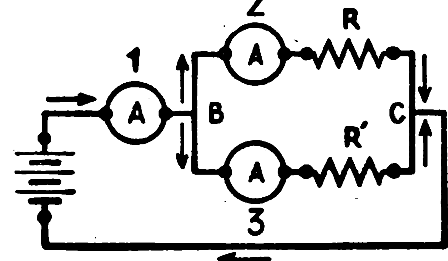


Fig. 9. — **Le Courant total est** la somme des courants dérivés.

L'ampèremètre 1 indique 4,4 *ampères*; c'est l'intensité du ***courant total.*** L'ampèremètre 2 marque 2,4 *ampères*, l'ampèremètre 3, indique 2 ampères.

Vous constatez que l'***intensité du courant total est la somme des intensités des courants dérivés.***

Cette loi est valable quel que soit le nombre des courants dérivés.

III. — Quantité d'électricité : ampère-heure.

7. En un temps déterminé, un courant transporte une certaine quantité d'électricité.

Jusqu'à un certain point, un courant électrique est comparable à un courant d'eau.

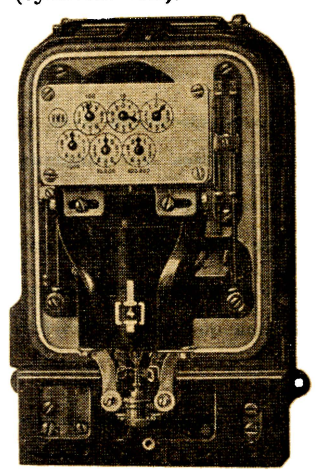
On précise l'importance d'un courant d'eau en indiquant son ***débit***, c'est-à-dire le volume d'eau qu'il transporte en une seconde, par exemple 3 *litres par seconde*.

En un nombre de secondes déterminé, soit 500 secondes, le courant d'eau fournit une ***quantité d'eau*** que l'on calcule en multipliant le débit par la durée en secondes de l'écoulement :

$$3 \times 500 = 1\,500 \textit{ litres.}$$

L'intensité d'un courant électrique correspond au débit d'un courant d'eau. Un courant électrique transporte en un temps déterminé une certaine ***quantité d'électricité***.

a) L'unité industrielle de quantité d'électricité est l'ampère-heure (symbole *Ah*).



Clichés Cie des Compteurs.

Fig. 10. — Un compteur ampère-heuremètre sert à mesurer les quantités d'électricité.

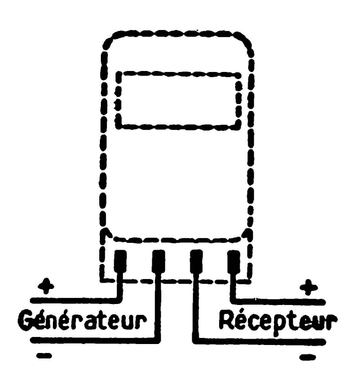


Fig. 11. — **Schéma de branchement d'un compteur ampère-heuremètre.**

1 ampère-heure est la quantité d'électricité transportée en 1 heure par un courant d'intensité 1 ampère.

En 1 *heure*, un courant de I *ampères* transporte I *ampères-heures*.
— t *heures* — de I *ampères* — I × t *ampères-heures*.

$$\boxed{Q = I \times t}$$

Ah A h

b) On donne le nom de ***coulomb***[1] à une quantité d'électricité égale à celle que transporte pendant ***1 seconde*** un courant de ***1 ampère***

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ ampère-seconde} = \frac{1}{3\,600} \text{ ampère-heure.}$$

REMARQUE. — Nous étudierons plus tard des *compteurs de quantité d'électricité*, c'est-à-dire des appareils qui, branchés sur un courant continu indiquent le nombre d'ampères-heures qui ont été transportés par ce courant pendant un temps déterminé, 2 mois par exemple; ce sont des ***ampèreheuremètres***.

Résumé.

1. — Pratiquement, on mesure l'intensité d'un courant électrique avec un *ampèremètre*.

Il existe des ampèremètres thermiques, des ampèremètres électromagnétiques, des ampèremètres à cadre mobile et aimant.

2. — L'intensité d'un courant électrique est la même en tous les points d'un circuit électrique sans dérivations.

Dans un circuit qui se bifurque en plusieurs branches, l'intensité du courant total est la somme des intensités des courants dérivés.

3. — Un *ampère-heure* (symbole Ah) est la quantité d'électricité transportée en *1 heure* par un courant de *1 ampère*.

Un courant de I *ampères* transporte en *t heures* une quantité d'électricité *Q ampères-heures*, telle que

$$Q_{Ah} = I_A \times t_h.$$

Un *coulomb* est la quantité d'électricité transportée en *1 seconde*, par un courant de *1 ampère*.

1 ampère-heure = 3 600 *coulombs*.

4. — On mesure les quantités d'électricité avec des compteurs dits ampèreheuremètres.

1. En mémoire de *Coulomb*, ingénieur et physicien français (1736-1806) (voir lecture 131).

Exercices.

1. **Une ligne électrique bifilaire** (à 2 fils) alimente 16 lampes à incandescence qui sont montées en *dérivation* entre les deux fils de ligne comme l'indique la figure 12.

10 de ces lampes absorbent chacune 0,52 *ampère*, les 6 autres chacune 0,87 *ampère*. Quelle est l'intensité totale du courant dans la ligne?

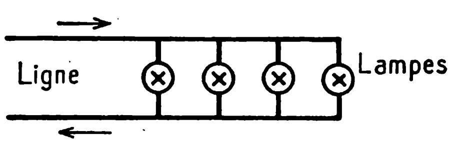


Fig. 12. — Figure pour l'exercice 1.

2. Dans les expressions « une lampe *absorbe* 0,5 *ampère* », « un radiateur électrique *consomme* 12 *ampères* », les mots *absorbe*, *consomme* sont-ils employés avec leur sens habituel? Précisez leur signification.

3. Un courant électrique de 12 *ampères* passe dans un circuit pendant 2 *heures* 30 *minutes*. Calculez la quantité d'électricité débitée : 1° en ampères-heures; 2° en coulombs.

4. Une batterie d'accumulateurs a une *capacité* de 90 *ampères-heures*, c'est-à-dire qu'elle peut fournir une quantité d'électricité égale à 90 ampères-heures.

Elle débite un courant constant de 8 *ampères* pendant 5 *heures* 15 *minutes*. Pendant combien de temps pourra-t-elle fournir *encore* un courant de 10 ampères?

Différence de potentiel : Volt.

1. Le courant électrique peut fournir de l'énergie sous diverses formes.

Un courant électrique peut, à volonté, dans des récepteurs appropriés, fournir (fig. 1) :

1° De l'***énergie calorifique*** ou chaleur, par échauffement de conducteurs convenablement choisis;

2° De l'***énergie mécanique*** ou travail mécanique, en faisant tourner des moteurs électriques;

3° De l'***énergie chimique***, en provoquant des décompositions chimiques dans des cuves à électrolyse.

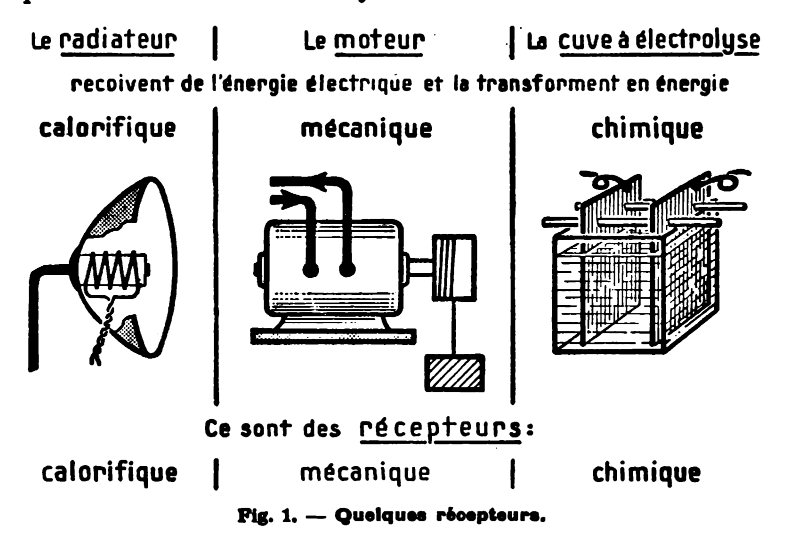


Fig. 1. — Quelques récepteurs.

2. Que devient l'énergie électrique fournie à un récepteur ?

Voici un *moteur*, c'est un *récepteur mécanique*. Pendant un temps *t secondes*, l'intensité I du courant étant constante, le moteur est traversé

par une quantité d'électricité $Q = I\,t$ *coulombs* qui lui fournit, sous forme électrique, une énergie W *joules* (fig. 2).

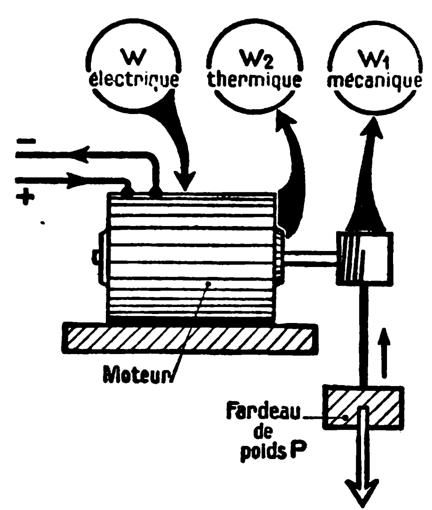


Fig. 2. — Le moteur reçoit de l'*énergie électrique W*; il fournit de l'*énergie mécanique W_1* et de l'*énergie thermique W_2*.

Le moteur soulève une charge, il effectue un *travail mécanique.*

Soit W_1 *joules* l'énergie mécanique qu'il fournit pendant le temps *t.* C'est l'***énergie utile.***

Le moteur s'échauffe et il échauffe l'air autour de lui.

Soit W_2 *joules* l'énergie dissipée en chaleur pendant le même temps.

Le moteur ne subissant aucune modification du fait de son fonctionnement l'énergie électrique qu'il reçoit est égale à la somme des énergies qu'il fournit; donc d'après le ***principe de la conservation de l'énergie :***

Énergie électrique reçue = Énergie mécanique + Énergie calorifique

$$W = W_1 + W_2.$$

3. Une certaine quantité d'énergie électrique se transforme pour chaque coulomb qui traverse le récepteur.

Pendant le temps *t*, une quantité d'électricité Q *coulombs* traverse le moteur qui reçoit une énergie électrique W *joules.*

Si les conditions de fonctionnement restent constantes, on dit que le moteur fonctionne en *régime permanent.*

Dans ces conditions, chaque coulomb qui traverse le récepteur lui fournit une quantité d'énergie W : Q.

Puisque chaque coulomb qui traverse le récepteur y produit de l'énergie, c'est qu'en entrant en A dans le récepteur il possède une énergie électrique supérieure à celle qu'il possède en B en sortant de ce récepteur. Son énergie électrique diminue en traversant le récepteur. On exprime ce fait en disant qu'entre les points A et B (cités dans le sens de passage du courant) existe une ***différence de potentiel*** (d. d. p.) électrique ou une *chute de potentiel,* ou encore une ***tension.***

4. Définition de la différence de potentiel entre deux points d'un circuit.

La différence de potentiel, ou tension,* U *entre deux points d'un circuit a pour mesure l'énergie électrique abandonnée par chaque coulomb entre ces deux points.

Lorsque Q *coulombs* cèdent, entre deux points A et B d'un circuit, une énergie W *joules*, la différence de potentiel U entre ces deux points est égale à :

$$U = \frac{W \text{ joules}}{Q \text{ coulombs}} \qquad (1)$$

5. Les différences de potentiel se mesurent en volts.

La formule (1) montre que U = 1 *volt* si W = 1 *joule* et Q = 1 *coulomb.*

Le volt est la différence de potentiel qui existe entre deux points A et B d'un circuit lorsque 1 coulomb qui passe de A en B perd entre ces points une énergie de 1 joule.

Si le régime est permanent, l'énergie absorbée par le moteur a même valeur pendant chaque seconde; c'est la puissance absorbée :

$$\underset{\text{watts}}{P} = \underset{\text{joules}}{W} : \underset{\text{secondes}}{t}.$$

On a donc :

$$\underset{\text{volts}}{U} = \frac{W}{Q} = \frac{P \times t}{I \times t} = \frac{P \text{ watts}}{I \text{ ampères}}$$

Si l'intensité du courant est I = 1 A et la puissance P = 1 W, la d. d. p U = 1 V; d'où la *définition légale du volt :*

Le volt est la différence de potentiel entre deux points d'un circuit telle qu'un courant constant de 1 ampère fournit entre ces deux points une puissance de 1 watt.

Définition entièrement équivalente à celle donnée à partir du joule et du coulomb.

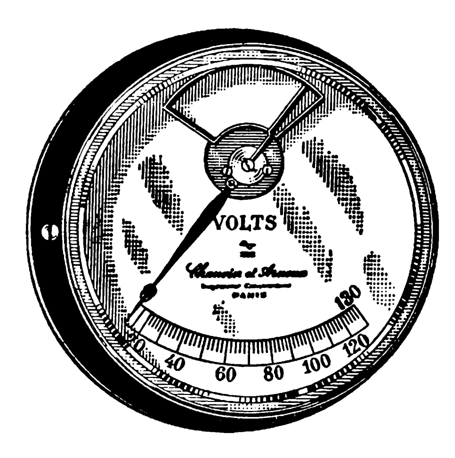


Fig. 3. — Cet appareil appelé *voltmètre* sert à mesurer la tension entre deux points d'un circuit électrique.

6. On mesure une différence de potentiel avec un voltmètre.

Les voltmètres (fig. 3) ont l'apparence extérieure des ampèremètres; nous étudierons plus tard comment ils sont faits et comment ils fonctionnent.

Expérience. — Relions les bornes d'un voltmètre par des fils conducteurs à deux points d'un circuit, par exemple les bornes d'un récepteur (fig. 5). Le voltmètre absorbe très peu d'énergie et ne modifie pratiquement pas le courant dans le circuit. L'aiguille dévie devant un arc gradué en volts. Nous lisons, sur cette graduation, la tension entre les deux points.

Le voltmètre est ainsi monté en *dérivation* sur le circuit principal, alors qu'un ampèremètre est placé *en série* dans le circuit.

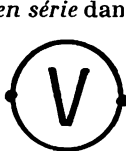


Fig. 4. — ***Représentation symbolique*** d'un voltmètre dans les schémas.

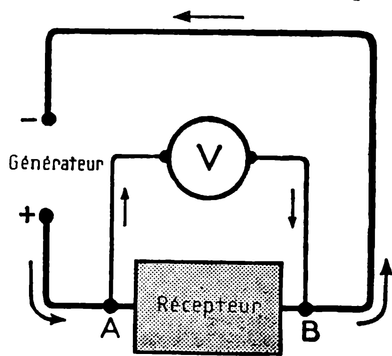


Fig. 5. — Un voltmètre se branche ***en dérivation*** aux bornes du récepteur.

7. Propriétés des différences de potentiel.

a. — *Récepteurs en série*

Expérience. — Réalisons un circuit analogue à celui de la figure 6, dans lequel plusieurs récepteurs sont en série.

A l'aide d'un voltmètre, nous mesurons successivement les tensions $U_1 = 2{,}5$ V entre A et B, $U_2 = 1{,}5$ V entre B et C et $U_3 = 1{,}8$ V entre C et D.

Mesurons la tension entre A et D, nous trouvons 5,8 V. Elle est égale à la somme $U_1 + U_2 + U_3 = 2{,}5 + 1{,}5 + 1{,}8$ *volts.*

Nous pouvions prévoir ce résultat. En effet, les récepteurs en série sont traversés par la même quantité d'électricité. Chaque coulomb abandonne entre A et B une énergie U_1 *joules;* entre B et C, U_2 *joules;* entre C et D U_3 *joules.*

Donc, entre A et D, il abandonne au total :

$U = U_1 + U_2 + U_3$ *joules.*

La différence de potentiel aux bornes d'un circuit est égale à la somme des différences de potentiel entre les extrémités de chaque élément du circuit.

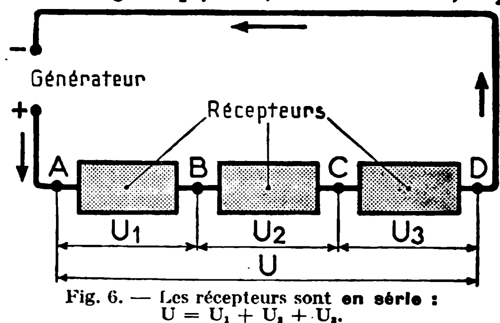


Fig. 6. — Les récepteurs sont **en série** : $U = U_1 + U_2 + U_3$.

b. — *Récepteurs en parallèle*

• Considérons deux récepteurs montés en parallèle (fig. 7). Les coulombs arrivant en A peuvent passer soit par le récepteur R_1 soit par le récepteur R_2. Une fois réunis au-delà de B ils ont tous les mêmes propriétés, aucune expérience ne permet de les distinguer, ils doivent donc tous perdre entre A et B la même énergie qu'ils passent par R_1 ou par R_2. La différence de potentiel entre les points A et B est donc la même que l'on suive le circuit AR_1B ou le circuit AR_2B.

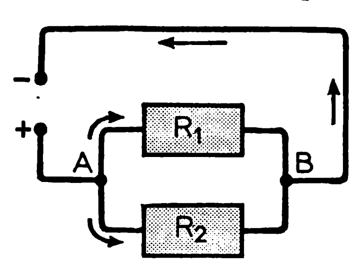


Fig. 7. — Les récepteurs R_1 et R_2 sont ***en parallèle*** : la chute de tension entre A et B est la même quelle que soit la dérivation suivie pour aller de A à B.

Le différence de potentiel entre deux points d'un circuit qui présente des dérivations est la même quelle que soit la dérivation suivie pour passer d'un de ces points à l'autre. C'est donc une propriété qui appartient aux deux points.

Résumé.

1. — Un courant électrique peut fournir de l'énergie sous diverses formes dans des récepteurs calorifique, chimique ou mécanique.

2. — Si chaque coulomb fournit entre deux points d'un circuit une énergie de U joules, on dit que la *différence de potentiel* ou la tension entre ces points est U *volts*.

3. — Le *volt* est l'unité de différence de potentiel. C'est la tension, entre deux points d'un circuit, telle qu'un courant constant de 1 ampère fournisse entre ces deux points une puissance de 1 watt.

4. — On mesure la différence de petentiel entre deux points d'un circuit avec un *voltmètre*, qui se monte en dérivation entre les deux points.

5. — La différence de potentiel entre les extrémités d'un circuit est égale à la somme des différences de potentiel entre les extrémités de chaque élément du circuit.

6. — La différence de potentiel entre deux points d'un circuit entre lesquels existent des dérivations est la même quelle que soit la dérivation suivie.

Exercices.

1. Quelle énergie faut-il : 1° en *calories*, 2° en *joules* pour chauffer 1 litre d'eau de 15 °C à 100 °C.

On veut obtenir cette énergie en 3 *minutes* avec un fil conducteur aux extrémités duquel on maintient un d. d. p. constante de 110 *volts*. Quelle est l'intensité du courant qui doit traverser le fil?

2. Quelle est la quantité de chaleur fournie, pendant 1 *heure*, par un radiateur électrique fonctionnant sous une tension de 125 *volts* et parcouru par un courant de 5 *ampères*.

3. Une bouilloire électrique porte à l'ébullition en 15 *minutes* 950 *grammes* d'eau prise à 14 °C. L'intensité du courant dans le fil est 3,2 *ampères*. La bouilloire absorbe pour s'échauffer la même quantité de chaleur que 50 *g* d'eau. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la bouilloire.

4. Un moteur électrique soulève verticalement une charge de 1 000 *kg* à la vitesse constante de 9 *m/mn*. Son rendement est 80 % et il est parcouru par un courant de 16 A. Calculer :

1° L'énergie calorifique dissipée chaque minute dans le moteur.

2° La différence de potentiel aux bornes du moteur.

LECTURE

Volta (1745-1827).

Vers 1789, ***Galvani,*** *alors professeur d'anatomie à Bologne (Italie), poursuivait des études sur l'action de l'électricité sur les animaux. Il utilisait pour ses essais des cuisses de grenouille. Un jour, fortuitement une cuisse suspendue à un balcon par un crochet de cuivre vint à toucher le fer du balcon. Le contact détermina des contractions vives et répétées du membre de la grenouille.*

Volta, *professeur de physique à l'Université de Pavie (Italie), s'intéresse à la découverte de Galvani. Il refait ses expériences, les modifie, imagine et construit des appareils à cette occasion; il est ainsi conduit à inventer, en 1800, la* ***pile électrique*** *qui porte son nom.* ***Pour la première fois, un courant électrique continu est réalisé.***

Cette invention est capitale. Elle met entre les mains des savants un nouvel instrument de travail; ils en tirent bientôt des découvertes sensationnelles, telles que les phénomènes d'électrolyse.



Fig. 8. — Volta, savant italien né à Côme (1745-1827).

C'est à Volta que l'on doit la notion fondamentale de ***tension électrique.*** *Il a bien mérité l'honneur que lui firent les électriciens en donnant son nom à l'unité de cette grandeur.*

Énergie et puissance électriques

1. Puissance fournie par un courant à une portion de circuit.

Lorsqu'entre deux points d'un circuit électrique la différence de est potentiel U *volts* et que l'intensité du courant est I *ampères*, la puissance P *watts* fournie par le courant à cette portion de circuit est :

$$\underset{\text{watts}}{P} = \underset{\text{volts}}{U} \times \underset{\text{ampères}}{I}$$

Cette formule très importante s'applique notamment à tous les récepteurs et à tous les générateurs.

Exemples. — 1° Un moteur est alimenté sous une tension de 220 V; il est traversé par un courant de 20 A. Ce courant lui fournit une puissance électrique de :

$$P = U \times I = 220 \times 20 = 4\,400 \text{ W}$$

soit 4,4 *kilowatts.*

2° Une dynamo débite 50 A, la différence de potentiel entre ses bornes est alors 120 V. Cette dynamo fournit au circuit qu'elle alimente une puissance électrique de :

$$P = U \times I = 120 \times 50 = 6\,000 \text{ W}$$

soit 6 *kilowatts.*

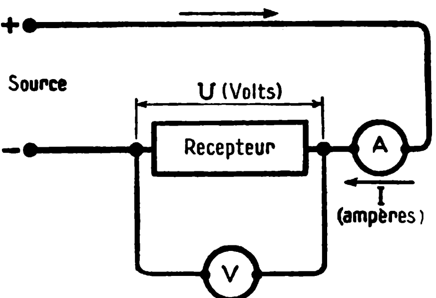


Fig. 1. — Pour mesurer la puissance absorbée par le récepteur, on lit les indications U (*volts*) du voltmètre et I (*ampères*) de l'ampèremètre, puis on fait leur produit.

2. Pour mesurer une puissance électrique en courant continu on peut utiliser un ampèremètre et un voltmètre.

L'ampèremètre est monté en série avec l'appareil, le voltmètre est branché en dérivation entre ses bornes (fig. 1). Le produit P = UI donne la puissance absorbée dans le cas d'un récepteur, la puissance débitée dans le cas d'un générateur.

Des appareils de mesure appelés ***wattmètres*** permettent de connaître la puissance par lecture directe. Nous les étudierons plus tard (43e leçon).

La ***puissance nominale*** d'un appareil électrique est celle pour laquelle l'appareil a été construit; c'est la puissance qu'il peut absorber ou débiter sans se détériorer. Mais sa *puissance réelle ou effective* dans un emploi déterminé peut être toute différente. Par exemple, une dynamo construite pour débiter en service continu 100 *ampères* sous une tension de 110 *volts* a une puissance nominale de 11 *kilowatts.* Quand elle débite seulement 10 *ampères* sous 110 *volts,* sa puissance effective n'est que 1,1 *kilowatt.*

Quand on indique la puissance d'un ***générateur,*** il s'agit de la puissance électrique qu'il fournit à l'installation qu'il alimente.

Quand on indique la puissance d'un ***moteur,*** il s'agit de la puissance mécanique disponible sur l'arbre.

3. Énergie électrique fournie à une portion de circuit.

Considérons une portion de circuit alimentée sous une différence de potentiel U et parcourue par un courant d'intensité I; l'énergie mise en jeu dans cette portion de circuit pendant un temps t est

$$W = P \times t \qquad \text{avec} \qquad P = U \times I.$$

La puissance étant exprimée en *watts,* l'énergie est mesurée en *joules* si on évalue le temps en *secondes*; mais l'énergie est mesurée en *watt-heures* si le temps est évalué en *heures.* On peut donc écrire :

W	= U ×	I ×	t
joules ou *watt-heures*	*volts*	*ampères*	*secondes* ou *heures*

Exemple. — Un radiateur électrique absorbe 6 A sous 120 V. Quelle est l'énergie électrique consommée en 30 *minutes?*

En *joules* : $W = 6 \times 120 \times 30 \times 60 = 1\,296\,000$ J.

En *watt-heures* : $W = 6 \times 120 \times \frac{30}{60} = 360$ Wh.

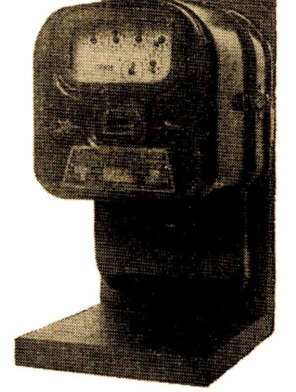


Fig. 2.
Compteur wattheuremètre.

4. L'énergie électrique se mesure avec un compteur.

La figure 2 représente un compteur wattheuremètre ou ***compteur d'énergie.*** C'est une sorte de petit moteur électrique dont l'arbre vertical tourne lentement et fait 1 tour quand le compteur est traversé par une quantité d'énergie connue, par exemple 0,6 *watt-heure.* Cette quantité caractéristique de l'appareil est la ***constante du compteur.***

Une série de petites roues dentées, engrenant les unes avec les autres et mues par l'arbre du compteur enregistre l'énergie qui a traversé le compteur.

Examinons le cadran de l'appareil. Il porte en grosses lettres l'indication *hWh :* l'hectowattheure est donc l'unité de mesure utilisée.

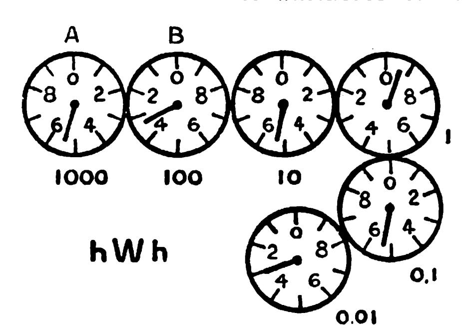


Fig. 3. — Cadran du compteur.
Il indique 5359,53 hWh.

Vous remarquez six petits cercles gradués de 0 à 10 sur lesquels se déplacent autant d'aiguilles, mais elles ne se meuvent pas toutes dans le même sens. Sur le cercle A qui indique les milliers d'hectowattheures, l'aiguille tourne dans le sens des aiguilles d'une montre; sur le cadran B, celui des centaines d'hectowattheures, l'aiguille tourne en sens inverse et ainsi de suite, alternativement dans un sens et dans l'autre (fig. 3).

Pour *relever le compteur*, on note les indications de toutes les aiguilles dans l'ordre des unités décroissantes; quand l'aiguille est entre les deux chiffres, c'est le plus faible qu'il faut lire. En effectuant la différence des nombres obtenus dans deux relevés, on obtient le nombre d'hectowattheures consommés dans l'intervalle[1].

Pour des mesures plus précises, on peut compter le nombre de tours effectués par le compteur.

Exemple. — La constante du compteur d'une installation intérieure est 0,6 Wh. Aucun appareil n'étant en service, branchons un fer à repasser sur une prise de courant et chronométrons la durée de 10 tours du compteur; nous trouvons 1 *minute* 12 *secondes*. Quelle est la puissance absorbée par le fer?

L'énergie absorbée est : $0,6 \times 10 = 6$ Wh soit

$$6 \times 3\,600 = 21\,600 \text{ joules.}$$

La durée de passage du courant est : $60 + 12 = 72$ *secondes.*
d'où la puissance : $P = W : t = 21\,600 : 72 = 300$ *watts.*

5. Réseau de distribution d'énergie à tension constante.

L'énergie électrique est distribuée aux abonnés sous tension constante; ce qui signifie que le producteur d'énergie maintient entre les

1. Dans certains compteurs, des chiffres remplacent les cadrans et les aiguilles. Pour « relever le compteur », il suffit de lire le nombre formé par ces chiffres.

fils de distribution une tension constante quels que soient les récepteurs branchés sur le réseau.

Cette tension est souvent comprise entre 120 et 130 *volts*, parfois elle est de 220 *volts*.

Les divers récepteurs sont prévus pour fonctionner sous cette tension, c'est leur ***tension nominale;*** ils sont branchés en dérivation entre les deux fils de distribution (fig. 4). Cette disposition a l'avantage de rendre les différents récepteurs indépendants les uns des autres. Chaque récepteur électrique (lampe, radiateur...) porte deux indications :

— Sa ***tension nominale***, celle sous laquelle on doit normalement le faire fonctionner;

— Sa ***puissance nominale***, celle qu'il absorbe lorsqu'il est branché sous sa tension nominale.

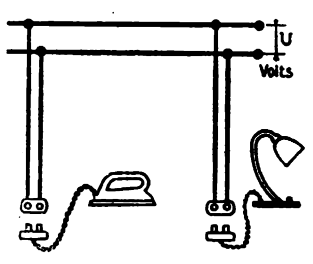


Fig. 4. — Distribution à tension constante. Les appareils peuvent être branchés sur les prises de courant; ils sont alors en dérivation sur la ligne de distribution.

Par exemple, le fer à repasser étudié ci-dessus porte les indications 125 V — 300 W. Il doit être branché sous une tension d'environ 125 V. Si nous le branchions sur un réseau à 220 V le courant absorbé serait trop grand et l'appareil serait rapidement endommagé.

Résumé.

1. — **Dans une portion de circuit traversé par un courant d'intensité I sous une différence de potentiel U, la puissance électrique mise en jeu est :**

$$P = U \times I$$

watts volts ampères

2. — **On peut mesurer une puissance en courant continu avec un voltmètre et un ampèremètre.**

3. — **L'énergie mise en jeu dans une portion de circuit a pour expression :**

$$W = U \times I \times t$$

joules *volts* *ampères* *secondes*
ou *watt-heures* *heures*

Cette énergie est mesurée par un compteur d'énergie ou wattheuremètre.

4. — **L'énergie électrique est distribuée sous tension constante.**

Exercices.

1. Des deux expressions :
1° le courant est vendu 20 francs le kilowatt;
2° l'énergie est vendue 20 francs le kilowatt-heure, quelle est celle qui est correcte? Justifier la réponse.

2. Sur le culot d'une lampe on lit : 150 *W* — 115 *V*.

1° Quelle est l'intensité du courant qui traverse la lampe en fonctionnement?

2° Combien d'énergie électrique consomme cette lampe en 3 1/2 h?

3° Qu'en coûte-t-il à raison de 26 francs le *kWh* pour l'éclairage?

3. La différence de potentiel entre les bornes d'un moteur est 120 *volts*; l'intensité qui le traverse est 30 *ampères*.

1° Calculer la puissance apportée par le courant électrique à ce moteur.

2° Sachant que 80 % de l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique, calculer la puissance mécanique de ce moteur en watts, en kilogrammètres par seconde et en chevaux-vapeur.

4. Une machine à coudre est entraînée par un moteur électrique de 0,1 *ch* dont le rendement est 0,40. Quelle est la dépense à l'heure quand le kilowattheure est facturé 20 francs?

5. Un moteur électrique absorbe 15 *ampères* et fournit une puissance mécanique de 2 *chevaux*. En 15 *minutes*, il consomme 450 *watts-heures*. Calculer son rendement et la tension d'alimentation.

6. Le chauffage d'un appartement nécessite par mètre cube et par heure une quantité de chaleur de 35 *kilocalories*. Combien coûte l'heure de chauffage d'une pièce de 50 m^3, si, pour le chauffage, le kilowatt-heure est payé 14 francs?

Les radiateurs sont branchés sur un réseau 120 *volts*, quelle est l'intensité du courant dans l'ensemble des radiateurs?

7. Un moteur à courant continu commande une pompe centrifuge qui élève 10 *litres* d'eau par seconde à 15,5 *mètres* de hauteur. Le moteur, dont le rendement est 0,82, absorbe 28,5 *A* sous 110 *V*. Calculer :

1° le rendement global du groupe moto-pompe;

2° la puissance mécanique fournie par le moteur à la pompe;

3° le rendement de la pompe.

3. – ACTIONS CALORIFIQUES DU COURANT

10e LEÇON

Résistance électrique

I. Notion de résistance électrique

1. Qu'entend-on par résistance électrique?

Expérience. — Dans un circuit, alimenté par une batterie d'accumulateurs et comprenant un ampèremètre, mettons successivement différents conducteurs f_1, f_2, f_3 entre les bornes B et C (fig. 1). Un voltmètre mesure la différence de potentiel entre ces points.

Notons la tension et l'intensité dans chaque cas :

Fil	Tension U lue au voltmètre	Intensité I lue à l'ampèremètre
f_1	6 V	0,6 A
f_2	6 V	0,6 A
f_3	6 V	0,3 A

Sous une même différence de potentiel le fil f_3 laisse passer un courant d'intensité plus petite que le fil f_1; on dit que ce fil oppose au passage du courant une résistance plus grande.

La résistance électrique d'un conducteur est la propriété de ce conducteur de s'opposer plus ou moins au passage du courant.

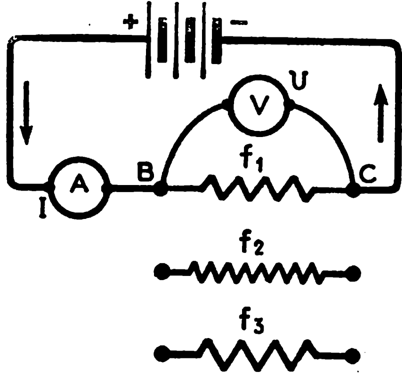


Fig. 1. — En montant successivement les conducteurs f_1, f_2, f_3 entre les bornes B et C, les intensités du courant dans le circuit sont, en général, différentes.

Les fils f_1 et f_2 laisse passer des courants de même intensité lorsque la d. d. p. entre leurs extrémités est la même : leurs *résistances* sont *égales*.

Pour une même d. d. p., le fil f_3 laisse passer un courant d'intensité deux fois plus faible que le fil f_1; sa *résistance* électrique est *double* de celle de f_1.

2. Mesure de la résistance électrique.

Expérience. — Aux bornes d'un même conducteur, le fil f_1 précédent, nous appliquons des d. d. p. différentes en modifiant le générateur. Nous utilisons, par exemple, un, puis deux, puis trois éléments d'accumulateurs. Lisons dans chaque cas le voltmètre et l'ampèremètre, puis effectuons le quotient U/I :

U *volts*	2	4	6
I *ampère*	0,2	0,4	0,6
U/I	10	10	10

Nous constatons que le quotient U/I est constant pour un conducteur donné; d'après les mesures du paragraphe 1, pour le fil f_3, ce quotient serait 6/0,3 = 20. Lorsque la résistance électrique double, le quotient U/I double; il mesure la résistance du conducteur.

La résistance électrique R d'un conducteur est mesurée par le quotient de la différence de potentiel U entre ses extrémités par l'intensité I du courant qui le traverse.

$$R = \frac{U}{I}.$$

3. L'unité de résistance électrique est l'ohm.

Si, dans la formule ci-dessus, nous exprimons les intensités en *ampères* et les d. d. p. en *volts*, les résistances sont exprimées en *ohms*[1].

L'ohm est la résistance d'un conducteur qui est parcouru par un courant de 1 ampère quand il existe entre ses extrémités une différence de potentiel de 1 volt (fig. 2).

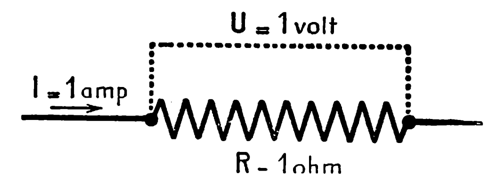


Fig. 2. — L'*ohm* est la résistance d'un conducteur qui est parcouru par un courant de 1 *ampère* quand il existe entre ses extrémités une différence de potentiel de 1 *volt*.

On le représente par le symbole **Ω**. (lettre grecque *oméga*).

On utilise souvent :

— un *sous-multiple*, le ***microhm*** : $1\ \mu\Omega = 10^{-6}\Omega$ (1 millionième d'ohm);

— un *multiple*, le ***mégohm*** : $1\ M\Omega = 10^{6}\Omega$ (1 million d'ohms).

4. Loi d'Ohm pour une résistance morte.

Les conducteurs utilisés dans les expériences précédentes sont seulement le siège d'un dégagement de chaleur; c'est le cas des réchauds électriques, des lampes à incandescence, des conducteurs qui servent de connexions entre appareils électriques. Aucune énergie mécanique ou chimique n'apparaît; ces conducteurs sont des récepteurs simplement calorifiques, on les nomme parfois ***résistances mortes*** ou encore *conducteurs passifs* (fig. 3).

Fig. 3. — Dans un schéma électrique, une *résistance morte* se représente par l'un ou l'autre de ces *symboles graphiques*.

Pour un tel conducteur, on peut écrire la formule R = U : I sous la forme U = RI qui traduit la première *loi d'Ohm :*

La différence de potentiel entre les extrémités d'un conducteur ne fournissant que de l'énergie calorifique est égale au produit de la résistance de ce conducteur par l'intensité du courant qui le traverse.

$$\underset{\text{volts}}{U} = \underset{\text{ohms}}{R} \times \underset{\text{ampères}}{I}$$

Répétons que cette loi ne s'applique qu'à des *conducteurs passifs*. S'en servir quand le récepteur est un moteur en marche ou une cuve à électrolyse en fonctionnement est absurde, c'est confondre un moteur ou un voltamètre avec un appareil de chauffage.

1. *Ohm* (1787-1854), physicien allemand qui établit mathématiquement les lois relatives à la résistance électrique.

II. Mesure de résistance avec un ampèremètre et un voltmètre

1. La loi d'Ohm R = U : I donne une méthode de mesure des résistances moyennes.

On fait passer un courant dans la résistance à mesurer. Un ampèremètre donne l'intensité I de ce courant. On mesure la tension U aux bornes de la résistance avec un voltmètre (fig. 4). On calcule R = U : I.

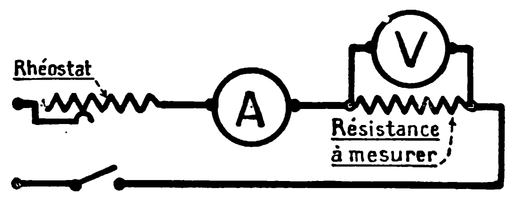


Fig. 4. — Montage pour mesurer une résistance par la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre.

Expérience. — Proposons-nous de mesurer la résistance d'une bobine de 1 *kg* de fil de cuivre isolé de 1 *mm* de diamètre.

Pour choisir les appareils nécessaires, nous tenons compte que la résistance à mesurer est de quelques ohms, que le fil peut supporter sans chauffer 8 à 10 *ampères*. Nous utiliserons un ampèremètre avec shunt de 10 *ampères*, un voltmètre de 0 — 75 *volts* et pour employer une source de courant à 110 *volts*, un rhéostat de lampes ou à plots d'environ 50 *ohms*.

Nous effectuons le montage de la figure 4.

Deux opérateurs liront simultanément, l'un les indications du voltmètre, l'autre les indications correspondantes de l'ampèremètre.

Les résultats des lectures sont inscrits dans le tableau qui suit :

LECTURES		CALCULS		
VOLTMÈTRE 150 divisions = 75 V	AMPÈREMÈTRE 100 divisions = 10 A	U	I	$R = \frac{U}{I}$
15,6 divisions	25 divisions	7,8 V	2,5 A	3,12 Ω
26,4 —	42 —	13,2 —	4,2 —	3,14 —
40,4 —	65 —	20,2 —	6,5 —	3,11 —
58,4 —	92 —	29,0 —	9,2 —	3,12

Nous choisirons la valeur moyenne 3,12 Ω.

REMARQUES. — 1. Pour éviter des erreurs et des confusions, il faut s'astreindre à noter soigneusement le nombre de divisions des échelles des instruments de mesure et le calibre employé.

Pendant les expériences, on écrira seulement les lectures faites. Les expériences terminées, on remplira la partie droite du tableau en calculant U, I et R.

2. Les valeurs de la résistance obtenue par les quatre mesures faites sont un peu différentes. En général, il en est toujours ainsi quand on fait des mesures : la valeur cherchée n'est obtenue qu'avec une approximation plus ou moins grande.

Le méthode de mesure employée peut être imparfaite : c'est le cas de celle que nous venons d'utiliser; d'une part, le courant échauffe le fil de cuivre et fait varier sa résistance; d'autre part, l'ampèremètre mesure l'intensité du courant dans la bobine augmentée de celle, très faible, du courant dans le voltmètre.

Les instruments de mesure ne sont pas parfaits. De bons ampèremètres et de bons voltmètres mesurent les intensités et les tensions avec une erreur relative possible de 1 %.

Enfin, *l'expérimentateur,* en lisant les indications des appareils de mesure, *commet des erreurs* plus ou moins grandes, suivant qu'il est plus ou moins soigneux.

Un bon expérimentateur sait choisir la meilleure méthode, les appareils les plus convenables, et il opère avec grand soin.

2. La méthode précédente ne peut être employée si la résistance à mesurer est très petite.

Pour obtenir une tension mesurable avec un voltmètre aux bornes de la résistance étudiée, quand cette résistance est inférieure à 0,01 Ω, il faudrait disposer d'un courant de plusieurs centaines d'ampères, ce qui est souvent impossible.

On compare alors la résistance x à mesurer à la résistance connue s d'un shunt d'ampèremètre (fig. 5).

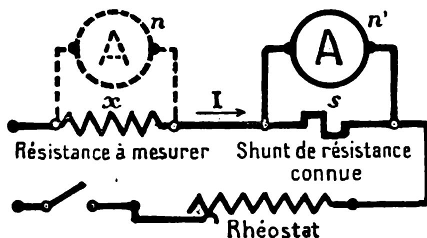


Fig. 5. — On peut mesurer une faible résistance en la comparant à celle d'un shunt d'ampèremètre.

On fait passer un courant constant dans la résistance à mesurer x et le shunt d'ampèremètre s montés en série. On branche le milliampèremètre successivement aux bornes de la résistance inconnue et à celles du shunt : soient n et n' les déviations de l'aiguille.

La résistance de l'ampèremètre est très grande vis-à-vis des résistances x et s; de sorte que, pratiquement, l'intensité I dans ces résistances est la même que l'ampèremètre soit branché ou non; les d. d. p. aux bornes de x et de s sont donc respectivement xI et sI.

Or, les déviations n et n' sont proportionnelles à ces d. d. p. Donc :

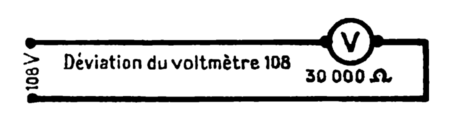
$$\frac{xI}{sI} = \frac{n}{n'} \quad \text{ou} \quad x = s\frac{n}{n'}.$$

Expérience. — Mesurons la résistance d'une règle en fer de 20 *cm* de longueur dont la section est un carré de 8 *mm* de côté.

Nous la comparerons à celle d'un shunt de 30 ampères, qui est de 1 335 microhms (inscrite sur le shunt)[1]. Nous trouvons environ 470 micrhoms.

3. Si la résistance inconnue est de plusieurs milliers d'ohms, on peut la mesurer avec un voltmètre.

Expérience. — Soit à mesurer la résistance x d'une bobine de transformateur de démonstration à grand nombre de spires de fil très fin.



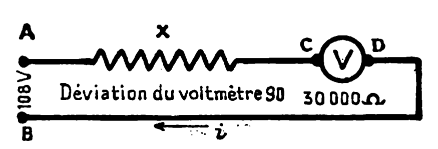


Fig. 6. — On peut mesurer une grande résistance en utilisant seulement un voltmètre.

Nous utiliserons un voltmètre 0 — 150 volts dont la résistance indiquée sur le cadran est de 30 000 Ω.

Branchons-le entre les deux bornes du secteur (fig. 6); l'aiguille du voltmètre dévie jusqu'à la division 108.

Montons en série la résistance x et le voltmètre; l'aiguille du voltmètre dévie jusqu'à la division 90.

Le courant i, dans le 2e montage, peut être calculé de deux manières différentes :

soit en considérant le circuit ACDB : $i = \frac{108}{x + 30\,000}$;

soit en considérant le circuit CD : $i = \frac{90}{30\,000}$.

Donc : $\frac{108}{x + 30\,000} = \frac{90}{30\,000}$

d'où l'on tire : $x = 6\,000$ ohms.

Résumé.

1. — **La résistance électrique d'un conducteur est la propriété qu'il a de s'opposer au passage du courant.**

2. — **La résistance électrique d'un conducteur est mesurée par le quotient de la différence de potentiel U entre ses extrémités par l'intensité I du courant qui le traverse:**

$$R = \frac{U}{I}.$$

1. Voir à la loupe, sur la figure 4 page 78 (14e leçon).

3. — L'unité de résistance est l'ohm : c'est la résistance d'un conducteur qui est parcouru par un courant de 1 ampère quand il existe entre ses extrémités une différence de potentiel de 1 volt.

4. — La loi d'Ohm se traduit par les trois expressions équivalentes :

$$R = \frac{U}{I} \qquad U = RI \qquad I = \frac{U}{R}$$

U en *volts* I en *ampères* R en *ohms*

5. — On peut mesurer la résistance d'un conducteur à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

Exercices.

1. Quelle tension faut-il appliquer aux bornes d'une résistance de 100 Ω pour qu'elle soit parcourue par un courant de 0,05 *A?*

2. Aux extrémités d'une résistance de 5 000 Ω est appliquée une tension de 110 *V*. Quelle est l'intensité du courant dans la résistance?

3. Quelle doit être la résistance d'un fil conducteur pour qu'une tension de 440 *volts* y produise un courant de 2 *ampères?*

4. Une lampe est marquée 120 *V* — 100 *W*. Que signifient ces indications? Quelle est la valeur du courant absorbé en fonctionnement normal? Quelle est la résistance de la lampe?

5. Mêmes questions pour un radiateur : 220 *V* — 1 000 *W*.

6. On mesure une résistance moyenne avec un ampèremètre et un voltmètre. L'ampèremètre a une graduation de 100 divisions, son calibre est 5 *A*; le voltmètre est gradué en 150 divisions, son calibre est 30 *V*.

Les lectures sont : ampèremètre. 44
voltmètre 56

Quelle est la valeur de la résistance mesurée?

7. On mesure une résistance x avec un voltmètre de résistance g. La résistance à mesurer et le voltmètre étant branchés en série sur le réseau de distribution, la déviation de l'aiguille du voltmètre est u. On court-circuite la résistance et on lit la tension U. Calculer x.

Application numérique : $g = 30\ 0000\ \Omega$, $U = 120\ V$, $u = 15\ V$.

Calcul de la résistance d'un fil conducteur.

Un fil conducteur homogène de section constante est complètement défini quand on connaît sa longueur, sa section et sa nature.

Comment sa résistance électrique varie-t-elle avec chacun de ces facteurs?

1. Influence de la longueur du conducteur.

Expérience. — Montons en série des fils de ferro-nickel de 1 *mm* de diamètre ayant 1 *m* de long, 2 *m* de long, 3 *m* de long (fig. 1). Réglons l'intensité du courant à 2 ampères et mesurons la différence de potentiel aux extrémités de chaque fil. Nous trouvons 2 volts, 4 volts, 6 volts.

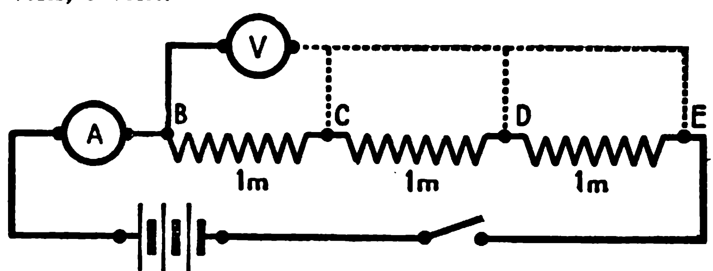


Fig. 1. — La résistance électrique d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur.

D'après la loi d'Ohm, R = U : I, les résistances sont respectivement 1 Ω, 2 Ω, 3 Ω.

Ces résistances sont *proportionnelles aux longueurs* des fils.

2. Influence de la section du conducteur.

Expérience. — Montons en série : un fil de ferro-nickel de 0,5 *mm* de diamètre et 1 *m* de long,

un fil de 1 *mm* de diamètre et 1 *m* de long,

un fil de 2 *mm* de diamètre et 1 *m* de long (fig. 2).

Réglons l'intensité du courant à 2 ampères et mesurons la différence de potentiel aux extrémités de chaque fil. Nous trouvons 8 volts, 2 volts, 0,5 volt.

D'après la loi d'Ohm, R = U : I, les résistances sont respectivement 4 Ω, 1 Ω, 0,25 Ω : elles vont en *décroissant*.

Or, les sections des conducteurs, qui sont proportionnelles aux carrés des diamètres, *croissent* comme les nombres 1, 4, 16, et vous pouvez

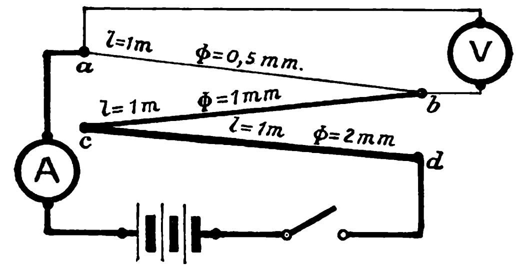


Fig. 2. — La résistance électrique d'un conducteur est inversement proportionnelle à sa section.

vérifier que le *produit* de la résistance par la section correspondante est constant.

Donc les résistances ***sont inversement proportionnelles aux sections*** des conducteurs.

3. La résistance d'un conducteur dépend de la nature du conducteur.

Expérience. — Montons en série (fig. 3) :

2 *m* de fil de *ferro-nickel* de 0,5 *mm* de diamètre;

2 *m* de fil de *cuivre* ayant aussi 0,5 *mm* de diamètre.

Réglons l'intensité du courant à 2 *ampères*. Mesurons la tension aux extrémités de chacun des fils. Nous trouvons 16 *volts* pour le ferro-nickel et 0,35 *volts* pour le cuivre.

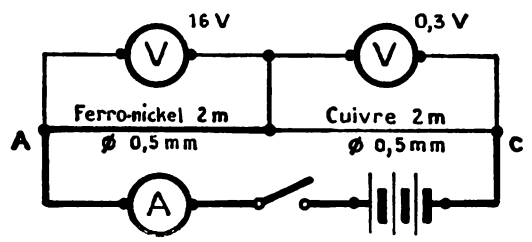


Fig. 3. — Les fils de ferro-nickel et de cuivre ont des résistances différentes.

Donc le ferro-nickel est environ 50 fois plus résistant que le cuivre à longueur et section égales.

La ***résistance d'un fil***, de longueur et de section données, ***dépend du matériau*** qui le constitue.

4. Chaque substance se caractérise, en ce qui concerne la résistance électrique, par sa résistivité.

La résistivité d'une substance est la résistance d'un conducteur fait de cette substance ayant 1 *cm*^{2} *de section et* 1 *cm de longueur* (fig. 5).

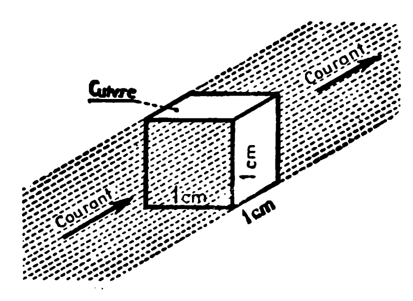


Fig. 5. — La *résistivité* du *cuivre* est la résistance d'un conducteur en cuivre ayant 1 *cm* de long et 1 *cm*^{2} de section.

On lui donne quelquefois le nom de *résistance spécifique* et on la désigne par la lettre grecque ρ (rô).

L'unité principale de résistivité se nomme *ohm.centimètre* (Ω.*cm*). Ce nom rappelle les unités employées dans la définition : l'ohm pour la résistance, le centimètre pour la longueur et par conséquent le centimètre carré pour la section.

Par exemple, la résistivité du cuivre pur est $\rho = 0{,}000\,001\,6$ Ω.*cm*; autrement dit un conducteur de cuivre de 1 *cm*^{2} de section, long de 1 *cm*, a une résistance de 1,6 millionième d'ohm.

Pour éviter les nombreuses décimales, qui sont causes d'erreurs, on utilise souvent la notation suivante :

$$\rho = 1{,}6 . 10^{-6}\ \Omega.\text{cm}.$$

Le facteur 10^{-6} signifie que la valeur de ρ s'obtient à partir de 1,6 en déplaçant la virgule de 6 chiffres vers la gauche : $\rho = 0{,}000\,001\,6$ Ω.*cm*.

Parfois aussi on emploie un sous-multiple de l'unité principale de résistivité, le *microhm.centimètre* ($\mu\Omega$.*cm*) qui en est la millionième partie : par exemple, pour le cuivre $\rho = 1{,}6$ $\mu\Omega$.cm.

5. Indiquons, à titre documentaire, la résistivité de quelques substances usuelles.

Celle des ***métaux purs*** est faible :

Argent	: $1{,}5 . 10^{-6}$ Ω.*cm*	Fer	: $10 . 10^{-6}$ Ω.*cm*
Cuivre	: $1{,}6 . 10^{-6}$ —	Nickel	$12 . 10^{-6}$ —
Aluminium	: $2{,}6 . 10^{-6}$ —	Mercure	: $94 . 10^{-6}$ —

La résistivité des ***alliages*** est, en général, plus élevée :

Laiton	(Cu 70 %	Zn 30 %)		$6{,}3 . 10^{-6}$ Ω.*cm*
Maillechort	(Cu 60 %	Zn 25 %	Ni 15 %)	$30 . 10^{-6}$ —
Manganine	(Cu 84 %	Mn 12 %	Ni 4 %)	$42 . 10^{-6}$ —
Constantan	(Cu 60 %	Ni 40 %)		$49 . 10^{-6}$ —
Ferro-nickel	(Fe 75 %	Ni 25 %)		$80 . 10^{-6}$ —
RNC$_3$	(Ni 60 %	Cr 15 %	Fe 25 %)	$111 . 10^{-6}$ —
Mégapyr	(Fe 65 %	Cr 30 %)	Al 5 %)	$144 . 10^{-6}$ —

Les solutions d'*acides*, ou de *bases*, ou de *sels*, ont une résistivité bien plus grande encore :

SO_4H_2 à 10 % : 3,6 Ω.*cm*.
NaOH à 10 % : 3,2 —
SO_4Cu à 10 % : 32 —

La résistivité de certains corps est énorme. On l'évalue en ***mégohms-centimètres***. Un mégohm-centimètre vaut un million d'ohms-centimètre. Exemples :

Caoutchouc vulcanisé :	$\rho =$ 1,46	millions de	mégohms-centimètre
Papier ordinaire	$\rho =$ 0,5	—	—
Verre ordinaire	$\rho =$ 90	—	—

Ces corps sont des *isolants*.

6. On peut calculer la résistance électrique d'un fil conducteur.

Problème. — *Quelle est la résistance R ohms d'un fil de* 1 *cm de longueur,* s *cm*² *de section, fait d'une substance dont la résistivité est* ρ Ω.*cm?*

Un conducteur de 1 *cm* de long	et 1 *cm*² de section	a une	résistance de	$\rho\ \Omega$
— *l cm*	— 1 *cm*²	—	—	$\rho\, l\, \Omega$
— *l cm*	— *s cm*²	—	—	$\rho \frac{l}{s} \Omega$.

Donc :

$$\underset{\text{ohms}}{R} = \underset{\text{ohms-centimètres}}{\rho} \times \frac{\overset{\text{cm}}{l}}{\underset{\text{cm}^2}{s}}$$

Application. — *Calculer la résistance d'un fil de cuivre de longueur* 100 *m, de section* 1 *mm*².

Ici, $l = 10\,000 = 10^4$ *cm*, $s = 0{,}01 = 10^{-2}$ *cm*² et $\rho = 1{,}6$ ***microhms-centimètres***, soit $\frac{1{,}6}{10^6}$. *ohm-centimètre.*

Donc : $$R = \frac{1{,}6}{10^6} \cdot \frac{10^4}{10^{-2}} = 1{,}6 \text{ ohm.}$$

Ce résultat montre que la résistivité d'un métal en microhms-centimètres et la résistance en ohms d'un fil de ce métal de 100 *m* de longueur et 1 *mm*² de section sont mesurées par le même nombre. On en déduit la formule pratique suivante :

$$\underset{\text{ohms}}{R} = \frac{\overset{\mu\Omega.\text{cm}}{\rho}}{100} \times \frac{\overset{\text{m}}{l}}{\underset{\text{mm}^2}{s}}$$

Résumé.

1. — La résistance d'un conducteur homogène, de section uniforme, est :
1° proportionnelle à sa longueur,
2° inversement proportionnelle à sa section,
3° variable avec la nature du conducteur.

2. — La *résistivité* d'une substance est le nombre qui mesure la résistance d'un fil de cette substance ayant 1 centimètre de longueur et 1 centimètre carré de section.
La résistivité se représente par la lettre grecque ρ (rô). L'unité principale de résistivité est l'ohm.centimètre (Ω.cm).

3. — La résistance d'un conducteur d'une longueur de *l* cm, de section *s* cm², fait d'une substance dont la résistivité est ρ Ω.cm est :

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

Exercices.

1. On coupe en deux morceaux d'égale longueur un fil de résistance R *ohms*. On tord les deux morceaux ensemble. Quelle est la résistance du conducteur ainsi formé?

2. Quelle est la résistance d'une ligne télégraphique en fil de fer galvanisé de 10 *km* de long et 3 *mm* de diamètre? La résistivité du fer galvanisé est 15 μΩ.*cm*.

3. Quelle longueur de fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre faut-il pour représenter 1 Ω? La résistivité du cuivre est 1,6 microhm-centimètre.

4. Quel est le diamètre d'un fil de ferro-nickel de 1 *m* de longueur et de résistance 1 Ω? La résistivité du ferro-nickel est 78 microhms-centimètres.

5. Un fil de cuivre de 2 *mm* de diamètre et de 5 *km* de longueur a une résistance de 25 Ω.
Quelle est la résistance d'un fil du même cuivre qui a 1 *mm* de diamètre et 1 *km* de longueur?

6. Une bobine de fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre pesant 1 *kg* a une résistance de 3,2 Ω.
Quelle est la résistance d'une bobine de fil de cuivre de 0,5 *mm* de diamètre pesant 500 g.

7. La résistivité du cuivre est 1,6. μΩ.*cm*, celle de l'aluminium 2,6 μΩ.*cm*.
On désire remplacer un fil de cuivre de 1,2 *mm* de diamètre par un fil d'aluminium sans modifier la résistance électrique de la ligne. Calculer le diamètre du fil d'aluminium à employer.

8. La résistance de 4 *m* d'un fil de maillechort de 1,2 *mm* de diamètre est 1,22 Ω à la température ordinaire. Calculer la résistivité de ce maillechort à la température ordinaire.

9. Avec du fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre, émaillé et recouvert d'une couche de coton, on désire fabriquer une bobine cylindrique ayant les dimensions suivantes : diamètre intérieur : 150 *mm*; diamètre extérieur : 279 *mm*; hauteur : 69 *mm*. L'émail et le guipage coton augmentent le diamètre du fil de 0,15 *mm*. Le cuivre a pour résistivité 1,6 μΩ.*cm* et pour densité 8,8*g/cm*³.

Déterminer : 1° le nombre de spires de la bobine; 2° la longueur moyenne d'une spire; 3° la longueur du fil de la bobine; 4° sa résistance; 5° son poids.

Indications sur la solution. 1° La hauteur d'une couche de spires est 69 *mm*; puisque le diamètre du fil, compte tenu de l'isolement est 1,15 *mm*, une couche comporte 69 : 1,15 = 60 spires.

L'épaisseur de l'enroulement est (279 — 150) : 2 = 64,5 *mm* correspondant à 64,5 : 1,15 = 56 couches.

Le nombre total de spires de la bobine est 60 × 56 = 3 360 spires.

2° Le diamètre moyen d'une spire est la moyenne arithmétique des diamètres extérieur et intérieur de la bobine, soit (279 + 150) : 2 = 214,5 *mm*, donc la longueur moyenne d'une spire mesure $\pi \times 214{,}5 = 674$ *mm* et la longueur totale du fil de la bobine 0,674 × 3 360 = 2 264 *m*.

Ce résultat est évidemment approché, mais l'approximation est très suffisante en pratique.

La résistance électrique varie avec la température.

1. La résistance d'un conducteur varie avec la température.

Expérience. Dans une marmite pleine d'huile (fig. 1), plongeons une bobine de 1 *kg* de fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre isolé au coton. Un thermomètre indique la température de l'huile, soit 15°. Faisons passer dans la bobine un courant de 2 ampères et mesurons la tension à ses bornes, nous trouvons 6,4 volts.

Température	U	I	R
15°	6,4 *V*	2 *A*	3,2 Ω.

Chauffons l'huile jusqu'à 100° et recommençons les mesures :

Température	U	I	R
100°	8,6 *V*	2 *A*	4,3 Ω

La résistance du fil a augmenté de 1,1 Ω pour une augmentation de température de 85°.

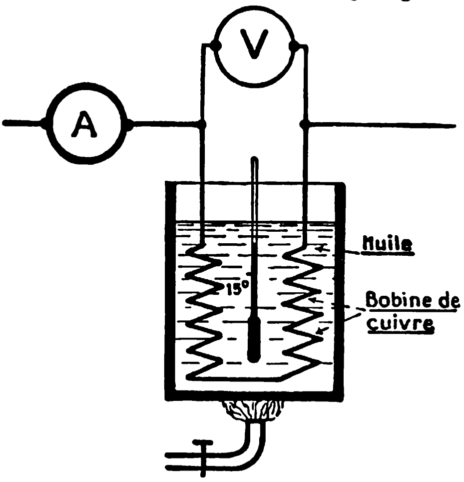


Fig. 1. — La résistance de la bobine de cuivre augmente quand la température croît.

2. Coefficient de température. — Formule $R_t = R_o (1 + at)$.

On représente par *a* l'augmentation de résistance d'un conducteur de 1 ohm pour un accroissement de température de 1°. Ce nombre *a*, qui se nomme *coefficient de température*, est pratiquement constant pour un métal déterminé dont la température varie de quelques dizaines de degrés.

Exercice. — *La résistance d'un conducteur à 0° est R_0. Quelle est sa résistance R_t à t°?*

La solution est résumée dans le tableau suivant :

Résistance à 0°	*Augmentation de température*	*Augmentation de résistance*
1 *ohm*	1 *degré*	a *ohm*
R —	1 —	a R_0 —
R_0 —	t —	a R_0t —

La résistance est R_0 à 0°. Elle augmente de R_0at entre 0 et t°. A t°, elle est donc :

$$R_t = R_0 + R_0at$$

ou

$$R_t = R_0(1 + at).$$

3. Le coefficient de température n'est pas le même pour les conducteurs de natures différentes.

Pour le cuivre, ce coefficient est 0,004. Pour le fer, il est environ 0,006 jusqu'à 800°, puis il croît très vite jusqu'à 850° où il atteint 0,018 et redevient 0,006 à température plus élevée.

La résistance des alliages varie moins avec la température que celle des métaux purs. Le *constantan*, alliage de 60 % de nickel et 40 % de cuivre, possède un coefficient de température si faible qu'il est négligeable.

La résistance du charbon et des électrolytes, la résistance des isolants comme le verre et la porcelaine *diminuent* quand la température s'élève; le coefficient a est négatif.

4. La résistance d'une lampe à filament métallique est bien plus grande à chaud qu'à froid.

Le filament des lampes est fait d'un métal nommé *tungstène*. Quand la lampe fonctionne, la température du filament dépasse 2 000°. Sa résistance est alors 13 fois plus grande qu'à froid.

Pendant le court instant que dure l'allumage, le courant est donc bien plus intense dans la lampe qu'en régime normal. Aussi ne faut-il pas allumer à la fois, par un seul interrupteur, un grand nombre de lampes.

5. L'augmentation de résistance d'un conducteur chauffé peut servir à déterminer sa température.

1° Les moteurs électriques, les dynamos, s'échauffent en fonctionnant. Pour connaître l'augmentation de température de leurs enroulements on peut se servir de leur augmentation de résistance.

Problème. — ***Les bobines des inducteurs d'un moteur ont, à la température ambiante, soit* 15°, *une résistance de* 53 Ω. *Après quatre heures de marche du moteur, cette résistance devient* 62 Ω. *Quelle est alors la température du fil de cuivre des bobines, sachant que le coefficient de température du cuivre est* 0,004 ?**

Désignons par R_0 la résistance à 0° des bobines; à 15° la résistance est 53 Ω.

Donc :

$$53 = R_0 (1 + 0,004 \times 15)$$

d'où

$$53 = R_0 \times 1,06$$

et

$$R_0 = \frac{53}{1,06} = 50\ \Omega.$$

A la température t^o que l'on cherche, la résistance est 62 Ω. Donc:

$$62 = 50\,(1 + 0{,}004t)$$
$$62 = 50 + 0{,}2t.$$

D'où
$$t = \frac{62 - 50}{0{,}2} = 60^\circ.$$

2° Un thermomètre à résistance de platine, qui peut être employé depuis — 200° jusqu'à + 800°, est constitué par un fil de platine de 0,1 *mm* de diamètre bobiné sur une feuille de mica et placé dans un tube de porcelaine.

On plonge cette *canne pyrométrique* dans le four ou le bain à température inconnue. On mesure la résistance du platine et l'on en déduit la température cherchée.

Jusqu'à 300°, on peut utiliser un thermomètre à résistance de nickel.

Résumé.

1. — **La résistance d'un conducteur varie avec la température. La loi de variation s'exprime par la formule :**

$$R_t = R_0\,(1 + at)$$

dans laquelle R_0 est la résistance à O$_0$, R_t la résistance à t^o, a un *coefficient de température*.

2. — **Le coefficient de température a est positif pour les résistances métalliques négatif pour le charbon et les électrolytes.**

3. — **On utilise cette propriété pour déterminer la température d'un enroulement et pour construire des pyromètres à résistance électrique.**

Exercices.

1. **La résistance d'un conducteur en cuivre est de 21, 2 Ω à 15°. Quelle est sa résistance à 0°, à 40°?**

Le coefficient de température du cuivre est 0,004.

2. **La résistance de l'induit d'une dynamo à 20° est 1,08 Ω. Après une longue période de fonctionnement la résistance est devenue 1,2 Ω. Quelle est alors la température de l'induit de la machine?**

3. **Calculer, d'après les résultats de l'expérience décrite au § 1, la résistance de la bobine de cuivre à la température de 0° et le coefficient de température du cuivre**

Calculer aussi la résistivité du cuivre à 0° sachant que la densité de ce métal est 8,8 *g/cm³*.

4. **Une valeur plus précise du coefficient de température du cuivre est $a = 1 : 234{,}5$. Démontrer que :**

$$t_2 - t_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1}\,(234{,}5 + t_1)$$

R_1 étant la résistance d'une bobine de cuivre à la température t_1 et R_2 la résistance de la même bobine à la température t_2.

Association de résistances en série.

Rappelons que des résistances sont dites montées en série, quand elles sont disposées bout à bout; elles sont alors traversées par le même courant. C'est un cas fréquent dans les installations électriques.

1. Quand des conducteurs sont montés en série, leurs résistances s'ajoutent.

Soient (fig. 1) les résistances AB et BC, ayant respectivement pour valeurs r_1 et r_2, montées en série :

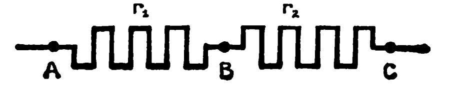


Fig. 1. — La résistance du conducteur AC est la somme des résistances des conducteurs AB et AC disposés en série.

1° elles sont traversées par le même courant i;

2° *la résistance de l'ensemble (résistance AC) est la somme des résistances partielles :*

$$R = r_1 + r_2.$$

Expérience. — Vérifions-le expérimentalement en mesurant successivement les résistances AB, BC, puis la résistance totale AC.

2. Applications aux voltmètres.

Un voltmètre industriel est constitué par un ampèremètre très sensible (milliampèremètre) avec, en série, une très grande résistance R (fig. 2).

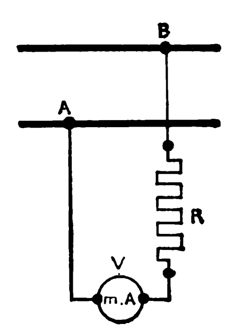


Fig. 2. — Schéma de principe d'un voltmètre : un milliampèremètre mA **est monté en série avec une très grande résistance R.**

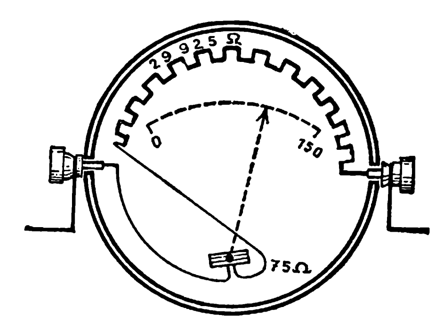


Fig 3. — Schéma de voltmètre à résistance intérieure.

Par exemple, voici un voltmètre pour 150 volts; c'est un milliampèremètre qui dévie des 150 divisions de son échelle pour un courant de 0,005 ampère [1].

La résistance de ce milliampèremètre est 75 ohms. Mais le constructeur a ajouté, en *série*, à cette résistance de 75 ohms (fig. 3) une résistance de 29 925 ohms. L'appareil a donc une résistance totale de 30 000 ohms. Monté sur 150 volts, il est traversé par une intensité de

$$150 : 30\,000 = 0{,}005 \text{ ampère.}$$

L'aiguille dévie alors de toute la graduation : 150 divisions.

A cause de sa grande résistance, le voltmètre monté entre les points A et B d'un circuit absorbe un courant très faible. On peut négliger la modification très légère qu'il apporte au circuit; pratiquement, la tension U qui existe entre A et B n'est pas modifiée par l'introduction du voltmètre.

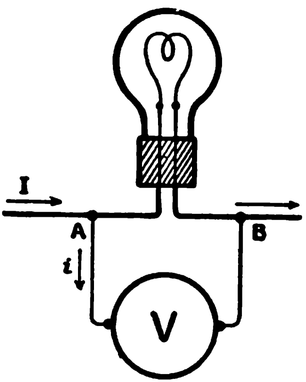


Fig. 4. — Il suffit de lire l'indication de l'aiguille du voltmètre pour avoir la d. d. p. entre les points A et B.

***Expérience.* — Branchons l'appareil entre deux points A et B d'un circuit : l'aiguille se fixe en face de la division 115 (fig. 4). Quelle est la différence de potentiel entre les points A et B?**

Pour une déviation de 150 divisions, le courant dans l'appareil est			0,005 A
—	1 —	—	$\frac{0{,}005}{150}$ A
—	115 —	—	$\frac{0{,}005 \times 115}{150}$ A

Puisque la résistance de la portion de circuit AVB est 30 000 Ω, et que l'intensité du courant qui la traverse est $\frac{0{,}005 \times 115}{150}$ **A, c'est donc que la d. d. p. entre A et B est égale (en vertu de la loi d'Ohm U = RI) à :**

$$30\,000 \times \frac{0{,}005 \times 115}{150} = 115 \text{ volts}$$

Il suffit donc de lire l'indication de l'aiguille pour connaître la d. d. p. entre les deux points connectés aux bornes du voltmètre.

1. Ces nombres se rapportent à un certain voltmètre. Ils sont différents, mais du même ordre de grandeur, pour les voltmètres des autres constructeurs.

3. Application au calcul de résistances additionnelles.

Une résistance additionnelle est faite d'un fil d'alliage à grande résistivité (maillechort, nickel-chrome, fer-nickel-chrome) enroulé sur une carcasse isolante qui peut supporter un fort échauffement. Une telle résistance se monte en série avec un récepteur et son effet peut se considérer de deux façons : soit *limitation de l'intensité du courant* dans le récepteur, soit *limitation de la tension* aux bornes du récepteur.

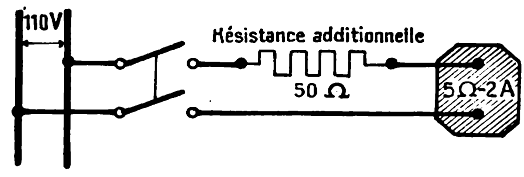


Fig. 5. — La résistance additionnelle limite le courant dans le circuit à 2 ampères.

1er *Exemple* (fig. 5). — Un appareil dont la résistance est 5 Ω doit être traversé par un courant de 2 ampères et l'on ne dispose que d'une tension de 110 volts. Pour que l'intensité soit 2 ampères, la résistance totale du circuit doit être

R = 110 : 2 = 55 Ω.

Puisque l'appareil a une résistance propre de 5 Ω, on mettra en série avec lui une résistance additionnelle de 55 — 5 = 50 Ω.

2e *Exemple.* — Une lampe à arc doit fonctionner sous 40 volts en absorbant 5 ampères. On veut la monter sous 110 volts (fig. 6).

On placera en série avec elle une résistance additionnelle qui produira une chute de tension de

110 — 40 = 70 V

pour une intensité de 5 ampères. La résistance additionnelle sera donc de : 70 : 5 = 14 Ω.

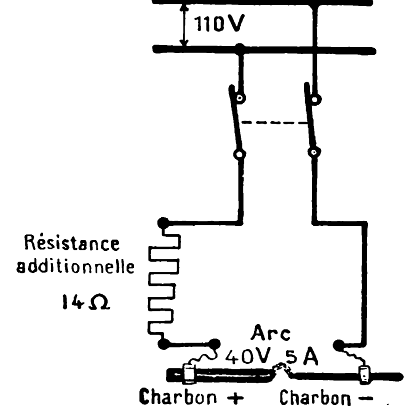


Fig. 6 — La résistance additionnelle limite à 40 volts la tension aux bornes de la lampe à arc.

4. Application aux rhéostats[1].

Ce sont des résistances variables introduites dans un circuit pour régler l'intensité du courant, en modifiant à volonté la résistance totale du circuit.

Les électriciens emploient beaucoup les *rhéostats à plots* dont les figures 7 et 8 donnent le schéma.

1. *Rhéostat*, nom formé de deux mots grecs : *rheos* (courant), *statos* (qui ne change pas).

5. Application aux boîtes de résistances.

Des résistances étalonnées sont disposées en série et intercalées

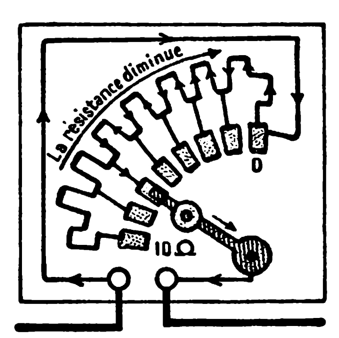


Fig. 7. — **Rhéostat à plots.** En tournant la manette vers la droite, on diminue la résistance en circuit

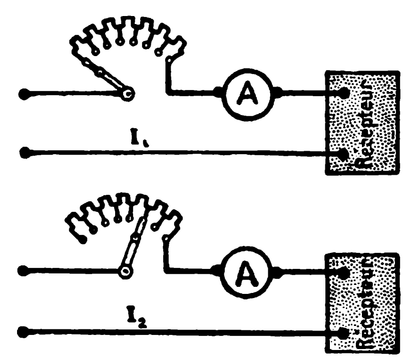


Fig. 8. — L'intensité croît quand on diminue la résistance du rhéostat en circuit : $I_2 > I_1$.

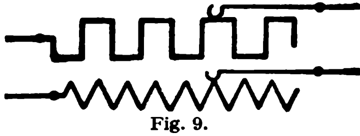


Fig. 9.
Symboles graphiques employés pour représenter un rhéostat dans les schémas électriques.

entre des plots de laiton, fixés sur une plaque isolante (fig. 10). Des fiches ou chevilles coniques en laiton réunissent les plots consécutifs.

Quand une cheville est en place, le courant passe d'un plot au suivant à travers la cheville dont la résistance est négligeable, et la résistance correspondante est pratiquement hors circuit. .

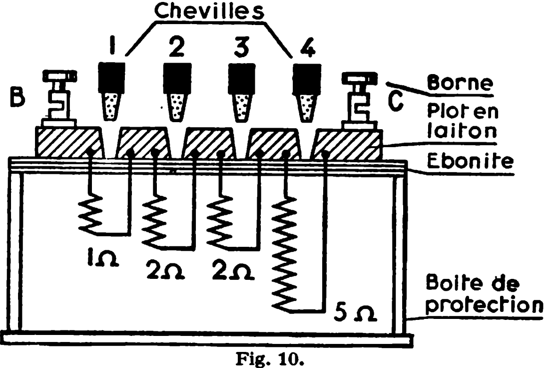


Fig. 10.
Croquis simplifié d'une *boîte de résistances*. La boîte représentée permet de réaliser à volonté entre les bornes B et C une résistance de 1,2,3...10 ohms.

Quand une cheville est enlevée, le courant passe dans la résistance étalonnée qui réunit les deux plots. Une boîte de résistances permet donc d'introduire dans un circuit une ou plusieurs des résistances qui la composent.

Si la boîte est constituée par 5 résistances qui valent respectivement 1, 2, 2 et 5 ohms

on pourrra mettre dans le circuit une résistance variant d'ohm en ohm de 1 à 10 ohms.

En général, les boîtes de résistances ne peuvent supporter que des intensités faibles (0,1 ampère). Ce sont des instruments de laboratoire.

Résumé.

1. — **Lorsque des conducteurs sont montés en *série*, leurs résistances s'additionnent.**

2. — **En montant en série avec un voltmètre une résistance convenable, on augmente à volonté l'échelle de mesure de l'instrument.**

3. — **Avec des résistances additionnelles fixes, ou des rhéostats dont la résistance est variable, on règle à la valeur désirée l'intensité du courant dans un appareil.**

4. — **Les boîtes de résistances contiennent des résistances connues que l'on peut associer en série pour réaliser telle résistance que l'on désire.**

Exercices.

1. Examiner la construction d'un rhéostat à plots. Faire le schéma de l'appareil. Monter un ampèremètre en série avec le rhéostat. Mettre un voltmètre en dérivation aux bornes du rhéostat. Mesurer I et U pour toutes les positions de la manette. Calculer les valeurs de R correspondantes.

2. Quelle doit être la résistance additionnelle du voltmètre étudié dans le paragraphe 2 de la leçon pour que l'échelle corresponde : 1° à 15 volts; 2° à 300 volts; 3° à 1 500 volts?

3. Pour mesurer une d. d. p. voisine de 220 volts, on dispose en série deux voltmètres gradués 150 volts et l'on additionne les deux lectures. Ce procédé est-il correct?

4. Une lampe à arc fonctionne avec 40 volts à ses bornes.

1° Quelle résistance faut-il ajouter à une lampe de 5 ampères pour la monter sur 110 volts?

2° Cette résistance additionnelle est construite avec du fil RNC_1 (35 % Ni + 10 % Cu + 55 % Fe) de 1 *mm* de diamètre. La résistivité de ce fil est 100 microhms-centimètres. Quelle longueur en emploiera-t-on?

5. Un moteur, pour machine à coudre, de 1/8 *ch*, 110 volts, a un rendement de 50 %, c'est-à-dire qu'il fournit en puissance mécanique 50 % de la puissance électrique qu'il absorbe.

1° Quelle puissance absorbe-t-il quand il fonctionne à pleine charge?

2° Quelle est l'intensité du courant qui lui est fourni?

3° Quelle résistance additionnelle doit-on mettre en série pour l'employer sur 220 volts?

6. Calculer les valeurs des résistances d'un rhéostat à 5 plots pour qu'en montant ce rhéostat sur 110 volts, en série avec un appareil de 5 ohms, l'intensité du courant soit 1, 2, 3, 4 ou 5 ampères suivant la position de la manette sur les plots du rhéostat.

Faire le schéma de l'appareil.

Association de résistances en parallèle.

Rappelons que des récepteurs sont dits groupés en parallèle ou en dérivation quand toutes les bornes d'entrée du courant dans les récepteurs sont connectées entre elles et que toutes les bornes de sortie sont aussi connectées ensemble (fig. 1).

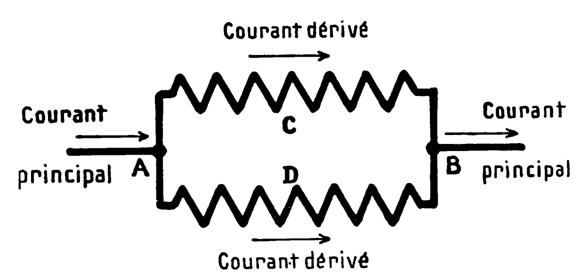


Fig. 1. — Les conducteurs ACB et ADB ont mêmes extrémités : ils sont en parallèle.

Le courant dans le conducteur avant et après la bifurcation se nomme *courant principal*; les courants dans les récepteurs en parallèle sont appelés *courant dérivés.*

1. L'intensité du courant principal est la somme des intensités des courants dérivés.

Expérience. — Montons deux résistances en parallèle (deux lampes à incandescence), entre les bornes de distribution du courant, (fig. 2). Mesurons avec des ampèremètres l'intensité I du courant principal et les intensités i_1, i_2, des courants dérivés.

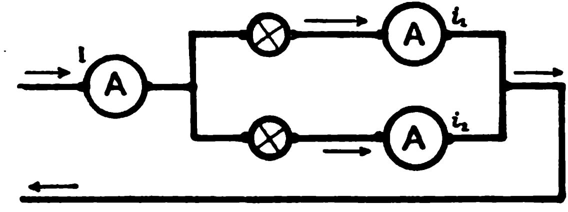


Fig. 2. — Le courant principal I est la somme des courants dérivés i_1 et i_2.

Nous constatons que

$I = i_1 + i_2$. (1)

Cette vérification a déjà été faite au cours de la 7e leçon.

2. Quand les récepteurs en parallèle sont des résistances pures, les intensités des courants dérivés sont inversement proportionnelles aux résistances des circuits dérivés correspondants.

En effet, U, différence de potentiel entre les points A et B (fig. 3), a la même valeur quelle que soit la dérivation que nous suivions pour aller de **A à B.**

La loi d'Ohm appliquée à chacune de ces dérivations donne :

$$U = r_1 i_1 \qquad U = r_2 i_2;$$

d'où $$r_1 i_1 = r_2 i_2 \quad \text{ou} \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

ce qui justifie l'énoncé, titre du paragraphe.

Problème. — *Connaissant* I, r_1, r_2, *calculer* i_1 *et* i_2. — **Il faut résoudre** le système d'équations à deux inconnues :

$$\begin{cases} I = i_1 + i_2 \\ r_1 i_1 = r_2 i_2. \end{cases}$$

On obtient :

$$i_1 = I\frac{r_2}{r_1 + r_2} \qquad i_2 = I\frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

3. On peut calculer la résistance R équivalente au faisceau des dérivations.

C'est la résistance qui, mise entre A et B, en remplacement des résistances r_1 et r_2 (fig. 3), ne modifierait ni l'intensité totale I, ni la différence de potentiel entre A et B.

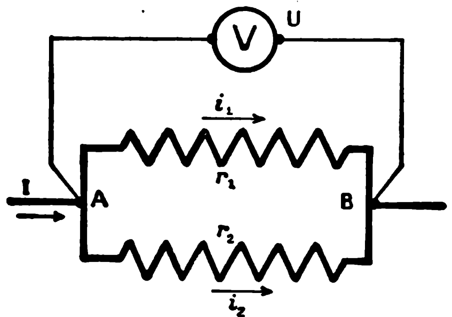


Fig. 3. — D'après la loi d'Ohm $U = r_1 i_1 = r_2 i_2 = RI$.

Donc $I = i_1 + i_2$

$$U = RI = r_1 i_1 = r_2 i_2.$$

De cette relation, on tire :

$$I = \frac{U}{R}, \quad i_1 = \frac{U}{r_1}, \quad i_2 = \frac{U}{r_2}$$

Par conséquent

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2}$$

et $$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \qquad (2)$$

L'inverse de la résistance équivalente est égal à la somme des inverses des résistances des circuits dérivés.

Les relations (1) et (2) sont valables quel que soit le nombre des circuits dérivés. On l'indique en les écrivant

$$I = \Sigma i \qquad \frac{1}{R} = \Sigma \frac{1}{r}$$ **(le signe Σ se lit : *somme de*)**

La première convient à tous les récepteurs, quelle que soit leur nature; la seconde, comme la première loi d'Ohm (U = RI), dont nous l'avons déduite, ne s'applique qu'à des résistances mortes.

4. Application aux shunts des ampèremètres.

Voici un ampèremètre de précision **du type dit « ampèremètre de contrôle » (fig. 4).**

Il se compose d'un milliampèremètre[1] dont l'aiguille dévie des 100 divisions de l'échelle pour un courant de 0,05 *ampère* et dont la résistance est 0,8 ohm[2].

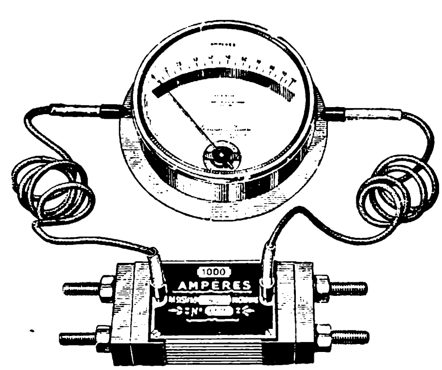


Fig. — 4. Cet ampèremètre de contrôle est composé d'un milliampèremètre et d'un shunt, ici le shunt pour 1 000 ampères.

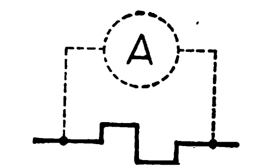


Fig. 5. — Symbole graphique d'un shunt d'ampèremètre.

Si l'on dispose entre ses bornes une dérivation ou *shunt* dont la résistance est $\frac{1}{199}$ de celle du milliampèremètre (soit 4 020 microhms), le courant dans le milliampèremètre est $\frac{1}{200}$ du courant total. L'ampèremètre shunté est ainsi utilisable de 0 à 10 ampères.

Si la résistance du shunt est $\frac{1}{1\,999}$, $\frac{1}{19\,999}$ de celle du milliampèremètre, l'appareil sert jusqu'à 100, jusqu'à 1 000 ampères.

Un shunt comporte deux *grosses bornes* pour l'arrivée et le départ du courant principal et deux *prises de courant*, trous avec broches ou petites bornes, pour le montage en dérivation du milliampèremètre. La résistance du shunt est celle de l'élément de circuit compris entre les deux prises de dérivation.

La figure 5 est le symbole graphique d'un shunt.

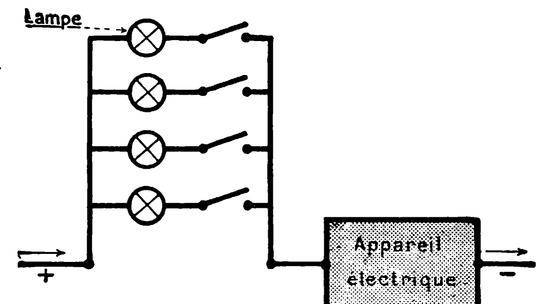


Fig. 6. — Rhéostat de lampes. Plus on allume de lampes plus l'intensité du courant principal est grande.

1. Un milliampèremètre est un ampèremètre gradué en millièmes d'ampères.
2. Ces nombres se rapportent à un ampèremètre d'un certain constructeur (Chauvin et Arnoux); ils sont différents, en restant du même ordre de grandeur, pour des appareils analogues d'autre fabrication.

5. Application aux rhéostats de lampes (fig. 6).

Ce sont des lampes à incandescence, montées en dérivation entre les deux bornes du rhéostat. On les allume ou on les éteint suivant la résistance à obtenir.

6. Montage d'un rhéostat en potentiomètre.

Pour appliquer à un appareil une tension variable, on fait passer un courant dans une résistance ou un rhéostat AB (fig. 7), et l'on branche l'appareil entre une borne A et un curseur mobile C.

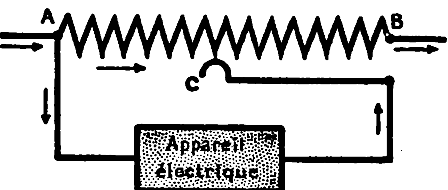


Fig. 7. — ***Potentiomètre.*** Il permet d'appliquer aux bornes de l'appareil électrique une fraction de la tension existant entre les points A et B.

En déplaçant le curseur de A vers B, on applique à l'appareil une tension qui va croissant depuis 0 jusqu'à la différence de potentiel existant entre A et B.

Résumé.

1. — Lorsque des conducteurs sont ***montés en dérivation***, l'intensité du courant principal est la somme des intensités des courants dérivés :

$$I = i_1 + i_2 + ...$$

2. — Les intensités des courants dérivés sont inversement proportionnelles aux résistances des circuits dérivés correspondants :

$$r_1 i_1 = r_2 i_2 = ...$$

3. — L'inverse de la ***résistance équivalente*** au faisceau de dérivations est égal à la somme des inverses des résistances dérivées :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + ...$$

4. — Les shunts d'ampèremètres sont des résistances que l'on monte en dérivation aux bornes des ampèremètres pour qu'il ne passe dans l'appareil qu'une fraction connue du courant à mesurer.

Dans les rhéostats de lampes, les lampes servent de résistances montées en dérivation.

5. — Grâce au montage en potentiomètre, on règle à la valeur voulue la tension appliquée aux bornes d'un appareil.

Exercices.

1. Entre deux points A et B d'un circuit, on maintient une d. d. p. de 12 volts. On dispose, en parallèle entre ces deux points, trois résistances valant respectivement 2 Ω 3 Ω et 4 Ω.

Quelle est l'intensité du courant dans chaque résistance?

Quelle est l'intensité totale du courant qui passe entre A et B?

Quelle est la résistance équivalente au faisceau des trois dérivations?

2. Un courant de 1 A se partage entre trois dérivations qui ont pour résistance 1 Ω 5 Ω, 12 Ω.

a) Quelle est la résistance équivalente à l'ensemble des dérivations?

b) Quelle est la d. d. p. entre les extrémités communes des trois dérivations?

c) Quelle est l'intensité du courant dans chaque branche?

3. Une bobine a une résistance de 1,004 Ω. Par quelle résistance faut-il la shunter pour que la résistance équivalente à l'ensemble soit de 1 Ω?

4. Pour fabriquer un rhéostat de lampes, on dispose de lampes de 60 watts, 110 volts. Combien faut-il en mettre en parallèle pour que, sous 110 volts, le rhéostat donne 6 ampères dans un appareil de résistance négligeable?

5. Un ampèremètre pour 10 ampères a une résistance de 0,05 ohm. Quelle sera la résistance du shunt permettant d'employer l'instrument jusqu'à 100 ampères?

6. Une résistance pour essais de machines se compose de 6 résistances égales, de chacune 30 Ω, supportant chacune un courant de 7 A sans échauffement excessif.

Ces résistances se montent soit :

1° toutes les 6 en série;

2° en deux séries de 3, les deux séries en parallèle;

3° en trois séries de 2, les trois séries en parallèle;

4° toutes les 6 en parallèle.

Faire le schéma des différents montages.

Calculer dans chaque cas :

1° la résistance totale de l'ensemble,

2° l'intensité totale maximum à admettre dans l'appareil,

3° la tension aux bornes correspondant à cette intensité maximum,

4° la puissance exprimée en watts, dissipée alors en chaleur Joule.

Expliquer pourquoi cette puissance est la même dans tous les cas.

7. Trois résistances, AB, BC, CA de chacune 10 Ω sont connectées de manière à former un triangle. Calculer la résistance de l'ensemble entre deux bornes A et B.

Dégagement de chaleur dans un conducteur. Loi de Joule

1. Un conducteur parcouru par un courant dégage de la chaleur.

Vous avez observé le dégagement de chaleur qui accompagne le passage d'un courant dans un conducteur. Le conducteur s'échauffe et échauffe l'air autour de lui, c'est l'***effet Joule.***

C'est le cas du fil d'un radiateur. Ce radiateur chauffe une pièce, nous savons que la quantité de chaleur qu'il produit dépend de la *durée de passage du courant.* Cette durée est l'*un des facteurs* de l'effet Joule.

Lorsque le radiateur est branché sous une tension très inférieure à sa tension nominale il est parcouru par un courant trop faible, il chauffe peu. Au contraire, sous une tension supérieure à la valeur nominale l'intensité est trop grande, il s'échauffe beaucoup et le fil peut fondre.

L'*intensité du courant* est un *deuxième facteur* de l'effet Joule.

Mais, le dégagement de chaleur n'est pas le même dans toutes les parties d'un circuit où cependant la durée du courant et son intensité sont les mêmes. C'est le cas du fil du radiateur et des conducteurs qui amènent le courant. Le fil résistant dégage beaucoup de chaleur alors que les fils de ligne, peu résistants, ne dégagent que très peu de chaleur.

La *résistance des conducteurs* est un *troisième facteur* de l'effet Joule

Nous allons étudier l'effet Joule dans les conducteurs *en faisant varier successivement chacun des trois facteurs, les deux autres restant constants.*

2. Recherche expérimentale de la loi de Joule.

Expériences. — Un fil de ferro-nickel AB, long de 50 cm, de diamètre 0,5 mm, est enroulé en hélice et soudé à deux tiges de cuivre assez grosses (résistance négligeable). Un ampèremètre, un rhéostat et un interrupteur sont en série avec ce fil. L'ensemble est branché aux bornes d'un générateur.

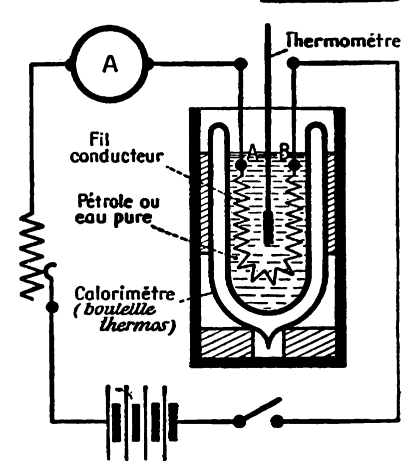


Fig. 1. — Montage pour mesurer la quantité de chaleur dégagée dans un conducteur.

Plongeons le fil AB dans 400 *grammes* de pétrole[1] contenus dans un *calorimètre,* une terrine Thermos par exemple (fig. 1). Un thermomètre divisé en 1/10 de degré nous indique la température du pétrole. Un chronomètre mesure la durée de passage du courant.

L'élévation de température du pétrole est proportionnelle à la quantité de chaleur dégagée dans le calorimètre par le conducteur AB.

a) ***Influence de la durée de passage du courant.***

Notons la température initiale 15°C, puis faisons passer un *courant constant* de I = 2 A. Lisons l'indication du thermomètre toutes les *deux minutes,* en ayant soin d'uniformiser la température en agitant le liquide.

R = 2 Ω, constante		I = 2 A, constante
Durée de passage du courant	**Température du pétrole**	**Élévation de température**
0 minute	15°	
2 minutes	16,15°	1,15°
4 —	17,3°	2,3° = 1,15 × 2
6 —	18,4°	3,4° = 1,15 × 3

La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur donnée par un courant d'intensité constante, ***est proportionnelle à la durée de passage du courant.***

b) ***Influence de la résistance du conducteur.***

Réalisons avec du fil de ferro-nickel des résistances de 1Ω, 2Ω et 4Ω. Pour chacun de ces fils, effectuons une mesure l'intensité du courant étant 2 A et sa durée 4 *minutes.*

1. On peut employer de l'eau, mais le pétrole est préférable parce que c'est un isolant.

I = 2 A, constante		t = 4 mn, constant	
Résistance	Température initiale	Température finale	Élévation de température
1 Ω	15°	16,15°	1,15°
2 Ω	16,1°	18,4°	2,3° = 1,15 × 2
4 Ω	18,3°	22,9°	4,6° = 1,15 × 4

La quantité de chaleur dégagée, par un courant constant et pour une durée de passage constante, ***est proportionnelle à la résistance du conducteur.***

c) ***Influence de l'intensité du courant.***

Reprenons le fil de résistance 2 Ω, nous y faisons successivement passer pendant 4 *minutes* des courants de 1 A, 2 A, 3 *ampères*.

R = 2 Ω, constante		t = 4 mn, constant	
Intensités	Température initiale	Température finale	Élévation de température
1 A	15,2°	15,8°	0,6°
2 A	15,7°	18,05°	2,35° ≃ 0,6 × 4
3 A	18°	23,3°	5,3° ≃ 0,6 × 9

La quantité de chaleur dégagée par un courant, dans un conducteur donné et pour une durée de passage constante, ***est proportionnelle au carré de son intensité.***

3. Loi de Joule.

En rassemblant les résultats de l'étude expérimentale précédente, nous pouvons énoncer la *loi de Joule :*

La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur par un courant électrique constant est proportionnelle à la résistance du conducteur, à la durée de passage du courant et au carré de l'intensité.

4. Le raisonnement nous permet d'établir la loi de Joule.

L'énergie fournie à un récepteur quelconque a pour expression :

(1) $$\underset{\text{joules}}{W} = \underset{\text{volts}}{U} \times \underset{\text{ampères}}{I} \times \underset{\text{secondes}}{t}.$$

Pour un conducteur passif, cette énergie se transforme en chaleur. Si le conducteur a une résistance R, la loi d'Ohm nous donne la valeur de la tension U entre ses bornes : $U = R \times I$. Remplaçons dans la formule (1) U par $R \times I$:

$$W = R \times I \times I \times t = R \times I^2 \times t$$

L'***énergie*** et la ***puissance électrique*** fournies à un conducteur de résistance R parcouru par un courant constant I sont données par les relations :

$$\underset{\text{joules}}{W} = \underset{\text{ohms}}{R} \times \underset{\text{ampères}}{I^2} \times \underset{\text{secondes}}{t}$$

$$\underset{\text{watts}}{P} = \underset{\text{ohms}}{R} \times \underset{\text{ampères}}{I^2}$$

Une *calorie* équivaut à 4,18 *joules*, la quantité de chaleur **q** dégagée dans le conducteur est :

$$\underset{\text{calories}}{q} = \frac{W}{4{,}18} = 0{,}24 \underset{\text{joules}}{W}.$$

$$\underset{\text{calories}}{q} = 0{,}24 \underset{\text{ohms}}{R} \times \underset{\text{ampères}}{I^2} \times \underset{\text{secondes}}{t}$$

Ces trois formules résument les résultats précédents, elles sont très importantes.

5. Les expériences précédentes donnent une mesure de la relation joule-calorie.

Avec les résultats de l'une des expériences précédentes nous pouvons déterminer l'équivalence entre énergie calorifique en *calories* et énergie électrique en *joules*.

Prenons, par exemple, la première expérience. En 4 *minutes* ou $4 \times 60 = 240$ *secondes*, un courant de 2 *A* passant dans une résistance de 2 Ω a élevé de 2,3 *degrés* la température de 400 *g* de pétrole.

Pour élever de 1 *degré* la température de 1 *g* de pétrole, il faut 0,5 *calorie;* pour élever de 2,3 *degrés* celle de 400 *g* il faut :

$$0{,}5 \times 2{,}3 \times 400 = 460 \text{ calories.}$$

L'énergie électrique reçue par le conducteur est :

$$2 \times 2^2 \times 240 = 1\,920 \text{ joules.}$$

Il faut donc 1 920 : 460 ≃ 4,2 *joules* pour produire une *calorie.*

Des mesures plus précises montrent que une calorie équivaut à 4,186 *joules.*

6. Conclusion.

L'effet Joule, que nous venons d'étudier, est la propriété la plus importante de la résistance électrique.

Nous avons montré successivement que la résistance électrique d'un circuit :

diminue l'intensité du courant,
produit une chute de tension le long du conducteur,
cause un dégagement de chaleur.

En réalité, ces trois propriétés sont trois aspects du même phénomène : la *transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique* dans un conducteur.

RÉSUMÉ

1. — Le passage d'un courant dans un conducteur y produit une quantité de chaleur proportionnelle :

— à la résistance R du conducteur,
— au carré de l'intensité I du courant,
— à la durée t de son passage.

2. — Les formules suivantes résument la *loi de Joule* :

$$W = R \times I^2 \times t \quad \text{(joules)} \qquad P = R \times I^2 \quad \text{(watts)}$$

$$q = 0{,}24\, R \times I^2 \times t \quad \text{(calories)}$$

Exercices.

1. Tendre horizontalement un fil de fer galvanisé de 1,50 *m* à 2 *m* de longueur et 0,5 *mm* de diamètre. Y faire passer un courant dont on fera croître l'intensité progressivement jusqu'à porter le fil au rouge. Couper le courant.
Observer et expliquer tous les phénomènes qui se produisent pendant l'expérience.

2. Dans une cuve à électrolyse, mettre une solution concentrée de carbonate de sodium, prendre comme électrodes deux morceaux de tôle, placer dans l'électrolyte un thermomètre et faire passer un courant de plusieurs ampères. Observer le thermomètre. La cuve est-elle seulement un récepteur chimique?

3. Combien de temps faut-il faire passer un courant de 5 *ampères* dans une résistance de 22 *ohms* pour chauffer un litre d'eau de 15° à 100 °C? On négligera les pertes de chaleur dues aux corps, autres que l'eau, qui s'échauffent (parois du vase, conducteur du courant, air du voisinage;...)

4. Une lampe 125 *V*.100 *W* est alimentée par une ligne de deux fils de cuivre ($\rho = 1{,}7\,\mu\Omega.cm$) ayant chacun 10 *m* de longueur et 12/10 *mm* de diamètre. Calculer la quantité de chaleur dégagée en 1 *heure* :

1° dans la lampe,
2° dans les fils de ligne.

5. Un fer à repasser électrique porte une plaque sur laquelle on lit 300 *W* — 220 *V*. On applique à ses bornes une tension de 110 *V*. Quelle est la puissance électrique transformée en chaleur?

6. Une bouilloire électrique, dont le rendement est 0,70, fonctionne sous 115 *V* en consommant une puissance de 300 *W*.

1° Quelle intensité absorbe-t-elle?

2° Quelle est sa résistance?

3° Combien de temps faut-il la laisser sous tension pour faire bouillir un litre d'eau prise à la température de 18° C?

7. Un radiateur électrique est prévu pour fonctionner sous une tension nominale de 120 *V*. Il a deux allures de chauffe correspondant à des puissances de 1 000 *W* et de 2 000 *W*. Ce radiateur est alimenté par une ligne à deux conducteurs de résistance totale 0,6 Ω. La ligne est branchée sur un réseau donnant une tension constante de 125 *V*. Quelles sont les tensions aux bornes du radiateur pour chaque allure de chauffe?

8. On désire construire une bouilloire électrique permettant d'élever de 10° à 100 °C la température de 1 litre d'eau en 5 *minutes* au moyen d'une résistance convenable.

1° Quelle devra être la résistance de l'élément chauffant quand la tension d'emploi est 220 *volts?*

2° Comment faut-il compléter l'appareil pour qu'il puisse fonctionner éventuellement sous 110 *volts*, avec la même puissance?

Y a-t-il plusieurs solutions possibles? Quelle est celle qui est préférable?

LECTURE

Joule (1818-1889).

James Prescott Joule *naquit en Angleterre, près de Manchester, en* 1818. *Son père était brasseur et Joule lui succéda à la tête de son industrie. Mais il avait le goût de la recherche scientifique et il occupa les loisirs, trop peu nombreux, que lui laissait sa profession à des études de physique.*



Fig. 2. — Joule, savant physicien anglais (1818-1889.)

Vers sa vingtième année, il fut l'élève d'un grand savant anglais, Dalton, qui l'employa comme aide dans des travaux sur les propriétés des gaz et des vapeurs.

Puis il commença des études sur le magnétisme, découvrit le phénomène de la saturation magnétique et inventa un moteur électrique.

Les découvertes qui l'ont rendu célèbre sont :

1° *en* 1842, *la loi qui porte son nom relative au dégagement de chaleur que produit le passage d'un courant électrique dans une résistance : la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au temps de passage du courant, à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant;*

2° *en* 1847, *l'équivalent mécanique de la calorie. Parmi les nombreuses expériences qu'il imagina pour déterminer cet équivalent, les plus intéressantes ont consisté à agiter soit de l'eau, soit de l'huile, soit du mercure avec une roue à palettes plongée dans*

le liquide et à mesurer d'une part l'énergie mécanique dépensée, d'autre part la quantité de chaleur produite.

Il a trouvé que pour produire 1 kilocalorie, il faut dépenser 432 kilogrammètres. On admet aujourd'hui le nombre 426.

Ces travaux de Joule sur la conservation de l'énergie furent d'abord assez mal accueillis par les autres savants. Il fallut dix années de persévérance au chercheur pour faire adopter ses conclusions.

Pourtant le mérite de Joule fut pleinement reconnu. Quand il mourut, en 1889, il était membre de la Société royale de Londres qui est, en Angleterre, ce qu'est l'Académie des sciences en France, et membre correspondant, depuis 1870, de notre Académie des sciences.

Conséquences pratiques de l'effet Joule.

Le dégagement de chaleur produit par le passage d'un courant électrique dans un conducteur est l'effet le plus commun du courant. Tous les générateurs électriques, tous les conducteurs, tous les récepteurs ont une résistance électrique et s'échauffent quand ils sont traversés par un courant. En général, ce dégagement de chaleur est nuisible; il n'est utile que dans les récepteurs thermiques.

I. Inconvénients de l'effet Joule.

1. L'effet Joule dissipe de l'énergie.

La puissance RI^2 watts transformée en chaleur dans un conducteur de résistance R parcouru par un courant I est en général de la *puissance inutilisée* (sauf, dans le cas des appareils de chauffage et d'éclairage).

On diminue cette perte en réduisant la résistance des fils qui conduisent le courant : il faut alors employer des fils de cuivre assez gros qui coûtent cher.

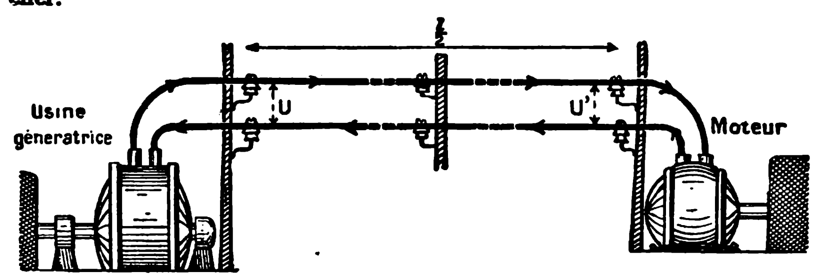


Fig. 1. — Dans la ligne où circule le courant, il se produit une chute de tension u
$u = U - U' = RI$.

Si la ligne à deux conducteurs, qui réunit une source de courant et un récepteur, a une résistance R et le courant une intensité I, la ***chute de tension*** dans la ligne est $u = RI$. La tension aux bornes du récepteur est inférieure de u volts à la tension de la source de courant : il se peut

que le fonctionnement du récepteur en devienne défectueux. Dans les installations d'éclairage, on ne tolère pas une chute de tension de plus de 3 pour 100 entre le compteur et la lampe la plus éloignée.

Si l est la longueur totale des deux fils de la ligne, s leur section, ρ leur résistivité, la résistance de la ligne est

$$R = \rho\frac{l}{s}$$

et la chute de tension :

$$u = RI = \rho l\frac{I}{s}.$$

Cette chute est donc proportionnelle pour une ligne de longueur l à la quantité $I : s$ que l'on nomme ***densité de courant.***

La densité de courant admise, en pratique, dans les conducteurs en cuivre est comprise entre 1 et 5 ampères par millimètre carré (A/mm^2), savoir :

section jusqu'à 5 mm^2 :	5 A/mm^2
de 6 à 15 mm^2 :	4 —
de 16 à 50 mm^2 :	3 —
de 51 à 100 mm^2 :	2 —
de 101 à 200 mm^2 :	1,5 —
au-dessus de 200 mm^2 :	1 —

2. Un conducteur parcouru par un courant atteint une température d'équilibre.

Dans un conducteur de résistance R, un courant d'intensité I apporte chaque seconde une énergie RI^2 joules qui se transforme en chaleur en donnant 0,24 RI^2 calories.

a) Si le conducteur est *très bien protégé* contre le refroidissement, toute la chaleur produite est employée à l'échauffer. La température du conducteur s'élève de plus en plus, jusqu'à la température de fusion du conducteur.

b) Mais le plus souvent le conducteur *perd de la chaleur*, soit par *conductibilité*, soit par *rayonnement*, soit par *contact* avec l'air ambiant et, en général, par ces divers moyens à la fois. La quantité de chaleur perdue par seconde augmente quand la température du conducteur s'élève.

Si le dégagement de chaleur par effet Joule n'est pas trop intense, il arrive un moment où *la chaleur perdue est égale à la chaleur produite.* La température du conducteur cesse de croître : elle reste constante aussi longtemps que les conditions ne changent pas; c'est la *température d'équilibre* correspondant à ces conditions.

La température d'équilibre est d'autant plus élevée que l'intensité est plus forte. Pour une intensité suffisante, le conducteur rougit. Si l'intensité augmente encore, il fond.

3. Un court-circuit ou un mauvais contact causent parfois des incendies.

Il y a ***court-circuit*** quand *deux conducteurs à des potentiels très différents viennent directement en contact :* un courant très intense s'établit alors entre eux; il les chauffe au rouge et allume les matières combustibles voisines (fig. 2). Un incendie peut en résulter.

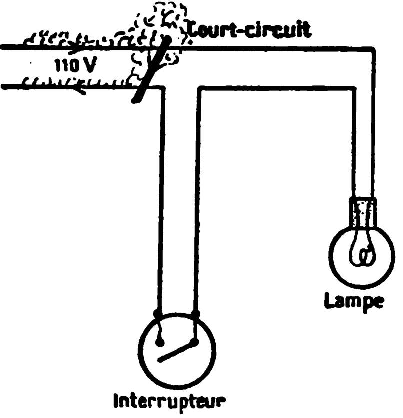


Fig. 2. — Un court-circuit peut provoquer un incendie.

Les ***mauvais contacts constituent une autre cause d'accidents.*** Si dans la suite des conducteurs d'un circuit, la jonction de deux portions successives est défectueuse (borne mal serrée, épissure mal faite, pièce mobile d'un interrupteur ne touchant qu'à peine la pièce fixe, etc.), à l'endroit du mauvais contact la résistance électrique est grande, l'effet Joule y devient très important. La chaleur détériore peu à peu l'appareil et peut causer un accident.

4. C'est l'effet Joule qui limite la puissance des machines électriques.

*La **puissance nominale** d'un moteur électrique est celle qu'il peut fournir sans que sa température d'équilibre dépasse la limite au-dessus de laquelle il serait détérioré.*

Si le moteur fournit une puissance beaucoup plus grande, il est traversé par un courant trop intense et sa température monte à tel point que les isolants, coton, carton, résine, qui entourent les conducteurs du moteur se carbonisent; les soudures à l'étain peuvent fondre. Le moteur peut être ainsi mis hors service : on dit qu'il est *grillé.*

Beaucoup de génératrices et de moteurs sont munis d'un ventilateur qui envoie un courant d'air rapide sur les enroulements pour activer leur refroidissement.

II. Applications de l'effet Joule.

5. Pour protéger les appareils et les canalisations électriques contre les surintensités, on emploie des fusibles (fig. 3).

Ce sont des fils ou des lamelles de plomb, d'alliage étain-plomb, d'aluminium ou des fils d'argent ou de cuivre argenté que l'on inter-

cale dans un circuit électrique. Lorsque l'intensité est normale leur température est peu inférieure à la température de fusion. Ils fondent et coupent le courant quand l'intensité devient trop grande.

Le tableau qui suit donne quelques dimensions de fusibles :

Intensités en ampères.	*Diamètres des fusibles plomb ou plomb-étain.*	*Diamètre des fusibles aluminium*
1	0,3 *mm*	
2	0,5	
3	0,7	
5	0,9	
10	1,4	0,4 *mm*
18	2,0	0,7

Fig. 3. — Symbole graphique employé pour représenter un coupe-circuit à fusible dans un schéma électrique. Il s'agit ici d'un fusible bipolaire, à fiche où à vis.

Les fusibles protègent bien contre les court-circuits francs. Mais il est difficile de régler avec précision l'intensité pour laquelle ils coupent le courant. De plus, le remplacement d'un fusible brûlé est une opération longue. On les utilise pour les très petites puissances (installations domestiques) à cause de leur simplicité. Pour les installations industrielles on leur préfère les *disjoncteurs.*

6. L'éclairage électrique par incandescence.

L'éclairage électrique sera étudié dans le cours du technologie, aussi nous n'en dirons que quelques mots.

On emploie actuellement deux sortes de lampes à incandescence

1° ***Les lampes à filament de tungstène dans le vide.***

Elles sont faites d'un fil de tungstène très fin (1/50 *mm*) et assez long (40 *cm*) disposé en zigzag à l'intérieur d'une ampoule où l'on a fait le vide (fig 4).

Le courant porte le fil à une température d'environ 2 000 °C. Le fil devient très lumineux. Le tungstène ne fond qu'à 3 385 °C.

De telles lampes consomment environ 1,5 watt par bougie. Elles sont peu employées.

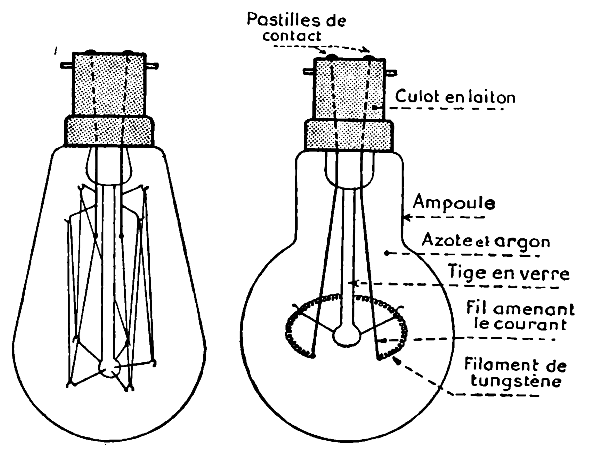
2° ***Les lampes à filament de tungstène dans une atmosphère gazeuse*** (fig. 4) sont faites d'un fil de tungstène enroulé en boudin dans une ampoule qui contient un gaz inerte, azote, argon ou krypton, à une pression d'environ 0,5 atmosphère à froid (38 *cm* de mercure).

La température du fil atteint en fonctionnement 2 600 °C.

La consommation descend pour les grosses lampes à 0,65 watt par bougie.

REMARQUE. — Les lampes à incandescence sont des appareils encore très imparfaits. L'énergie électrique y est bien tout entière transformée

en chaleur. (Ce sont des résistances mortes.) Mais il n'y a que 0,01 à 0,03 de cette énergie calorifique qui soit finalement utilisée pour l'éclairage.



Lampe à filament de tungstène **dans le vide.**

Lampe standard. Le filament de tungstène est enroulé en une hélice de faible pas, de petit diamètre et l'ampoule est pleine d'azote et d'argon.

7. Le chauffage électrique fait de rapides progrès.

1° Appareils électro-ménagers. — 1° Les fers à repasser, les bouilloires, les réchauds, les fers à souder électriques et les petits radiateurs d'appartement renferment un élément chauffant constitué par un fil de nickel-chrome ou de fer-nickel-chrome, résistant, peu fusible et peu oxydable.

L'appareil est plus durable si le fil chauffant est protégé du contact de l'air. On l'entoure de magnésie qui est un isolant électrique bon conducteur de la chaleur.

2° *Chauffage des locaux.* — L'énergie vendue par les secteurs de distribution est surtout demandée en abondance pour l'éclairage pendant les premières heures de la nuit. En dehors de ces heures de *pointes* elle est en général livrée à tarif réduit. Aussi emploie-t-on trois systèmes de chauffage pour les appartements :

***a) Chauffage direct.* — La chaleur dégagée dans les résistances des radiateurs est diffusée au fur et à mesure de sa production. Ce système est employé comme chauffage d'appoint ou dans les régions où l'énergie électrique est, à toute heure, très bon marché. On prévoit une puissance de 40 à 50 watts par mètre cube de pièce à chauffer.**

***b) Chauffage par accumulation.* — La chaleur produite la nuit**

dans les résistances est accumulée dans une masse importante de matériaux réfractaires. Pendant la journée, de l'air circule autour des parties chaudes et diffuse la chaleur dans l'appartement (fig. 5).

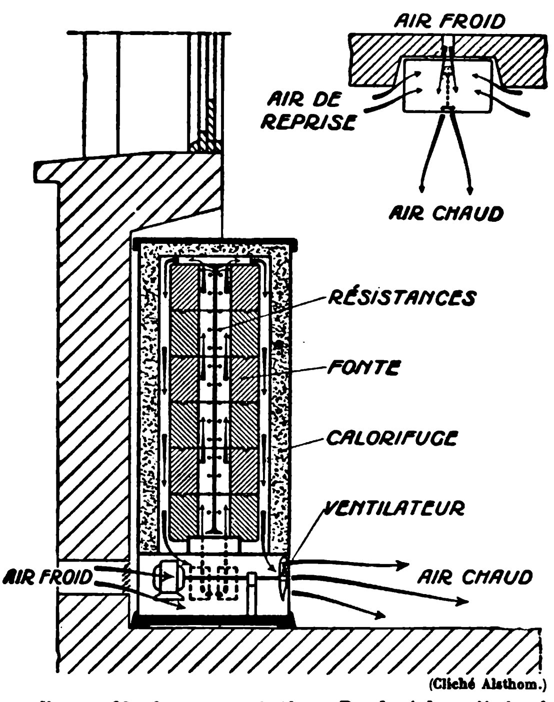


Fig. 5. — Coupe d'un **poêle à accumulation.** Pendant la nuit, la chaleur dégagée dans les résistances est emmagasinée dans des masses en fonte. Pendant la journée, un ventilateur, mû par un petit moteur électrique, fait circuler de l'air autour de ces masses; l'air réchauffé est envoyé dans la pièce à chauffer.

c) ***Chauffage mixte ou par semi-accumulation.*** — C'est une combinaison des deux systèmes précédents. Une masse réfractaire permet de passer les heures de pointe sans consommer d'énergie électrique.

3° ***Soudeuses électriques des ateliers.*** — On utilise de plus en plus dans les ateliers de tôlerie des soudeuses électriques par points. Une soudeuse par points est constituée essentiellement par deux tiges conductrices entre lesquelles on serre très fort les tôles à réunir; on y fait alors passer pendant un temps très court un courant de grande intensité. La région de contact des tôles est chauffée au blanc et les tôles se soudent (fig. 6).

Par un procédé analogue on soude bout à bout des barres de métal et même des rails : on presse fortement les extrémités l'une contre l'autre puis on fait traverser les parties en contact par un courant très intense qui les porte à la température de soudure.

Les appareils à soudure par points et à soudure en bout utilisent du courant alternatif et non du courant continu.

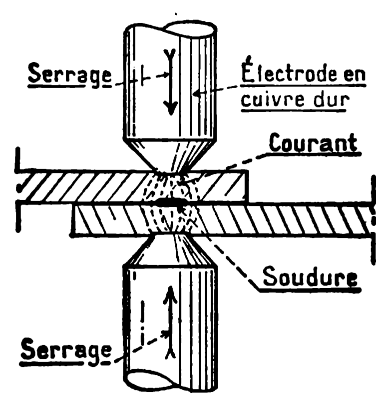


Fig. 6. — Soudure par points : les deux tôles à assembler sont fortement serrées entre deux électrodes en cuivre et on y fait passer pendant une durée de 0,01 à 0,3 seconde un courant de 5 000 à 50 000 ampères sous une tension de 2 à 10 volts.

Résumé.

1. — Cas où la chaleur dégagée par effet Joule est nuisible :

a) **elle cause une *chute de tension* entre les générateurs et les récepteurs et oblige à limiter *la densité de courant;***

b) **elle échauffe les conducteurs électriques et provoque parfois des incendies;**

c) **elle échauffe les enroulements des machines électriques et limite la puissance de ces machines.**

2. — Cas où la chaleur dégagée par effet Joule est utile :

a) **les coupe-circuit fusibles protègent les appareils électriques;**

b) **l'éclairage électrique par incandescence utilise la chaleur Joule;**

c) **les appareils de chauffage électrique sont très commodes, mais parfois d'un usage coûteux;**

d) **les soudeuses par points suppriment le rivetage pour l'assemblage des métaux en feuilles.**

Exercices.

1. En faisant traverser un fil de plomb de 50 *mm* de longueur et 1 *mm* de diamètre par un courant d'intensité croissante, on déterminera l'intensité qui produit la fusion.

2. Examiner un fusible Gardy et en faire le croquis.

3. L'élément chauffant d'une bouilloire électrique comprend deux résistances AB et BC en série de chacune 55 Ω. L'appareil fonctionne sous 110 volts avec trois allures de chauffe :

a) le pôle positif de la canalisation est relié en A, le pôle négatif en C,

b) le pôle positif est en B, le négatif en C,

c) le pôle positif est en B, une dérivation du négatif en A, une autre en C.

Calculer : 1° l'intensité dans l'appareil pour chacune des allures,

2° la puissance électrique transformée en chaleur dans chaque cas.

4. Une installation d'éclairage à 110 volts comprend 20 lampes de 60 watts, 60 lampes de 100 watts, 40 lampes de 200 watts. La distance moyenne des lampes au compteur est 100 mètres (200 *m* de conducteurs).

On demande :

a) la puissance de l'installation;

b) l'intensité du courant quand toutes les lampes sont allumées;

c) la résistance de la ligne si la chute de tension entre le compteur et les lampes est de 5 volts;

d) la section de cette ligne en cuivre de résistivité 1,8 $\mu\Omega$. *cm*;

e) la densité de courant correspondante.

5. Une bouilloire électrique absorbe en état de fonctionnement 2,5 ampères sous 110 volts et met 12 minutes pour porter un demi-litre d'eau de 13° à 100 °C.

Quelle est la résistance de chauffage?

Quelle est la dépense si le kilowatt-heure est payé 0,3 NF?

Quel est le rendement de l'appareil sachant qu'il faut transformer 4,18 joules en chaleur pour obtenir une calorie?

6. La tension du courant alimentant une usine est 120 volts à l'arrivée au compteur. A 300 mètres du compteur existe un bâtiment où l'on projette d'installer 100 lampes à incandescence de 100 watts, 110 volts. La ligne reliant l'installation d'éclairage au compteur sera faite en fil d'aluminium de résistivité 2,66 microhms-centimètres.

Calculer la densité de courant et la section de la ligne pour que la chute de tension à pleine charge ne dépasse pas 3 % de la tension du réseau.

7. On possède deux radiateurs électriques, l'un de 1200 watts, 110 volts, l'autre de 800 watts, 120 volts. On les monte en série sous tension de 220 volts.

Calculer la puissance électrique transformée en chaleur par chacun d'eux en supposant que leur résistance ne dépend pas de l'intensité qui les traverse.

8. Le filament d'une lampe à incandescence a une longueur de 31 *cm* et un diamètre de 0,02 *mm*. Il est formé de tungstène qui, à la température de 0°, a une résistance de 0,055 Ω pour un fil de 1 *m* de long et 1 mm^2 de section.

1° Calculer la résistance du filament à froid.

2° Dans les conditions de fonctionnement normal, avec 110 *V* aux bornes, la lampe consomme 25 *W*. Calculer le courant dans la lampe et la résistance à chaud du filament.

La résistance à chaud est plus grande que la résistance à froid. En admettant que le filament atteint 2000° quand la lampe fonctionne, quel est le coefficient moyen de température du tungstène?

9. Le fil d'argent d'un fusible a un diamètre de 0,2 *mm* et une longueur de 5 *cm*. L'argent a une densité de 10,5 g/cm^3, sa résistivité est 1,5 $\Omega\mu$.*cm.*, sa chaleur spécifique 0,550 *calorie par gramme et par degré* et son point de fusion 960°.

Quelle est l'intensité du courant qui amène le fusible à sa température de fusion en 0,01 *seconde?*

On admet que le refroidissement du fil est négligeable pendant une durée si brève et que toute la chaleur Joule produit par le courant est employée à échauffer l'argent,

Le courant électrique et le corps humain

1. Le courant électrique est dangereux pour les imprudents.

Chacun connaît les plaques portant l'indication « Danger de mort » qui sont fixées sur les poteaux des lignes de transport d'énergie électrique et sur les portes des cabines de transformation (fig. 1).



Fig. 1. — Le danger électrique est invisible. Il n'en est que plus redoutable.

Il arrive malheureusement que des personnes ***imprudentes*** ou ***mal renseignées*** sur les dangers du courant électrique soient ***électrocutées***.

2. Deux sortes de courants sont employés dans les distributions d'énergie électrique.

Le courant continu, caractérisé par la constance du sens du courant dans les conducteurs, est encore utilisé dans des secteurs installés depuis longtemps et dans des usines où des machines à courant continu sont indispensables.

Le courant alternatif est actuellement le plus employé. C'est un courant qui change de sens un grand nombre de fois par seconde et qui, d'un changement de sens à l'autre, varie d'intensité (fig. 2). Le nombre de fois qu'un tel courant reprend le même sens au cours d'une seconde se nomme la *fréquence* du courant. La fréquence 50 est la plus utilisée. On dit aussi qu'un tel courant est à 50 *périodes*. En médecine, en télégraphie et téléphonie sans fil (T. S. F.), on se sert de courants à 5 000 périodes par seconde, et plus encore. Ce sont des *courants à haute fréquence*.

Le courant continu et le courant alternatif agissent un peu différemment sur les êtres vivants.

3. Action du courant électrique sur le corps humain.

a) Quand un courant traverse le corps ou une partie du corps :

1° quelquefois il produit des brûlures; ces brûlures sont en général longues à guérir et laissent des cicatrices;

2° il détruit les tissus vivants en électrolysant le contenu des cellules qui le constituent;

3° surtout il provoque des accidents nerveux souvent mortels, soit, si la tension n'est pas élevée, la paralysie du cœur, soit, à tension plus haute, la paralysie des centres respiratoires et l'asphyxie par arrêt du fonctionnement des poumons.

b) La sensibilité du système nerveux au courant électrique varie avec les individus et, pour la même personne, avec son état physiologique

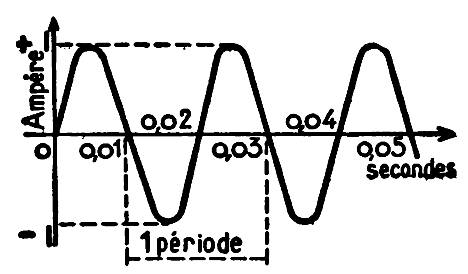


Fig. 2. — Courbe de l'intensité d'un courant alternatif fourni par les secteurs électriques en fonction du temps.

et psychique à l'instant de l'accident. C'est ainsi qu'un contact électrique est plus dangereux quand il est inattendu et surprend le patient que lorsqu'il est prévu et voulu. De même, il est plus dangereux à l'état de sommeil qu'à l'état de veille.

c) Si le courant, dans le corps humain, ne parcourt qu'un bras ou une jambe, il est moins dangereux que s'il traverse la région du cœur et des poumons.

d) Le courant alternatif de fréquence moyenne (25 à 100 périodes par seconde) produit une crispation des muscles. Il n'est plus possible de lâcher un conducteur de courant alternatif sous tension quand on l'a saisi : les muscles de la main se contractent et serrent fortement le conducteur qu'il faudrait abandonner.

Les courants à haute fréquence (plus de 5 000 périodes par seconde) ne sont pas dangereux. Ils ne pénètrent pas dans le corps et se propagent seulement par la couche extérieure de la peau.

4. Valeur de l'intensité de courant dangereuse.

Des expériences de plusieurs savants ont établi que la mort peut être causée :

1° par une intensité de 0,05 *ampère en courant continu*;

2° par une intensité de 0,025 *ampère en courant alternatif* de fréquence moyenne.

5. Valeur de la résistance du corps humain.

Le corps humain est une masse de tissus très riches en eau avec des sels dissous, donc bons conducteurs; cette masse est enveloppée par la peau dont la résistance électrique est grande.

Les résultats de nombreuses mesures de résistance faites sur diverses personnes diffèrent beaucoup les uns des autres. Entre les deux mains d'ouvriers, mains calleuses et bien sèches, on a trouvé de 40 000 à 100 000 ohms. Pour des employés de bureau, cette résistance n'a été que 5 000 ohms.

La résistance peut s'abaisser jusqu'à 1 000 ohms, si la peau des mains est pénétrée d'humidité par de la sueur, de la vapeur ou de l'eau tiède.

6. Tensions dangereuses.

On trouve, en appliquant la formule $U = RI$, qu'en courant continu l'intensité dangereuse de 0,05 ampère est obtenue dans une résistance de 1 000 ohms avec une tension de $1\,000 \times 0{,}05 = 50$ volts[1].

En courant alternatif, l'intensité dangereuse de 0,025 ampère est produite par $1\,000 \times 0{,}025 = 25$ volts.

Le décret du 4 août 1935 qui a imposé l'emploi, dans certains cas, de basses tensions, dites *tensions de sécurité*, fixe le maximum de ces tensions de sécurité à 24 *volts alternatifs* ou 50 *volts continus*.

7. Conditions dans lesquelles se produisent les accidents.

Ou bien le corps de la victime a touché simultanément deux points du circuit entre lesquels existe toute la tension de l'installation : le contact a été *bipolaire*.

Ou bien le corps a touché d'une part un point du circuit, d'autre part est resté en contact avec le sol dans un endroit où le sol est conducteur : le contact est dit *unipolaire*. Ce cas est le plus fréquent, il se produit par exemple quand il y a chute sur une personne d'un conducteur aérien.

8. Secours et soins aux électrocutés.

a) Si la victime est restée en contact avec le conducteur sous tension, les sauveteurs risquent de s'électrocuter en touchant le corps du blessé sans avoir pris de grandes précautions.

1. La résistance du corps humain diminue quand la tension croît ou quand la durée d'application de la tension augmente. Ce n'est pas une résistance comme les résistances métalliques. Se servir de la loi d'Ohm quand il s'agit du corps humain ne conduit donc qu'à des conclusions incertaines.

Pour écarter de la victime le conducteur sous tension. Il faut s'isoler du sol le plus possible par des planches ou des madriers secs, accrocher le conducteur avec un morceau de bois sec long de plus d'un mètre en se protégeant les mains avec des gants, des vêtements de laine non humides, du tissu caoutchouté, du papier en plusieurs épaisseurs.

Si l'on peut y arriver très rapidement, il est préférable de couper ou de faire couper le courant au départ de la ligne.

b) On appellera un docteur pour soigner l'électrocuté et, en attendant le médecin, on tentera la respiration artificielle puisque beaucoup de cas d'électrocution sont des asphyxies (méthode Schaffer).

9. Prévention des accidents.

a) Les règles à suivre pour réaliser des installations électriques donnant des garanties de sécurité sont imposées aux entrepreneurs par le décret du 4 août 1935 et les instructions qui l'accompagnent. Ce serait une faute grave de ne pas s'y conformer.

b) *Un ouvrier électricien doit éviter de travailler sur une ligne sous tension.* Il est presque toujours facile d'isoler du reste de l'installation la partie du circuit où l'on travaille, soit en enlevant les fusibles de sécurité, soit en ouvrant l'interrupteur au tableau de distribution.

c) *Quant aux jeunes gens, étudiants ou apprentis en électricité, qu'ils n'oublient pas qu'un courant, qu'une installation électrique sont dangereux. On ne manœuvre pas, sans s'assurer que personne n'est occupé sur la ligne correspondante, un disjoncteur ou un interrupteur d'un tableau de distribution. On ne joue pas avec le courant électrique,* on ne s'amuse pas à électriser un camarade : jeux et plaisanteries risquent de se terminer tragiquement.

Résumé.

1. — Le courant électrique est dangereux, surtout le courant alternatif.

2. — La mort par électrocution résulte soit de la paralysie du cœur, soit plus souvent de l'arrêt de fonctionnement des poumons.

3. — Il suffit, pour la produire, que le corps soit traversé par une intensité de 0,05 ampère en courant continu ou de 0,025 ampère en courant alternatif.

4. — Sont dangereuses les tensions supérieures à 50 volts en courant continu et à 24 volts en courant alternatif.

5. — On soigne les électrocutés comme les asphyxiés en pratiquant la respiration artificielle.

6. — Les règles à suivre dans l'exécution des installations électriques ont été fixées par le décret du 4 août 1935 et les instructions annexes.

Exercices.

1. Une ligne double passe sur 2 isolateurs portés par la même ferrure. Par suite du mauvais état des isolateurs, un faible courant est dérivé à travers les isolateurs et la ferrure. La résistance du 1er isolateur est 2 500 Ω; la résistance du 2e est 10 000 Ω. Le réseau est à courant continu; sa tension est 500 V.

En admettant que la résistance du corps humain d'une main à l'autre est 5 000 Ω et que le courant dangereux est 0,050 A, est-il dangereux de saisir à la fois :

a) les 2 fils du réseau?

b) le fil qui passe sur l'isolateur 1 et la ferrure?

c) — — 2 — ?

Solution de l'exercice 1. Désignons par B le fil qui passe sur le premier isolateur, par C celui qui passe sur le second. (Faites les figures.)

a) Quand un homme dont la résistance est 5 000 Ω touche B d'une main et C de l'autre, le courant à travers son corps atteint 500 : 5 000 = 0,1 *A*, intensité dangereuse.

b) Quand il touche le fil B et la ferrure de l'isolateur, la résistance de son corps, 5 000 Ω, est en parallèle avec la résistance d'isolement, 2 500 Ω, de B. La résistance équivalente x est telle que :

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{5\,000} + \frac{1}{2\,500} = \frac{3}{5\,000}, \qquad \text{d'où} \qquad x = 1\,666\ \Omega.$$

Entre le fil B et le fil C se trouvent donc en série la résistance 1 666 Ω et la résistance d'isolement de C, 10 000 Ω, soit au total 11 666 Ω. Le courant entre B et C a pour valeur 500 : 11 666 = 0,0429 A.

Ce courant se partage entre le corps de l'homme et la résistance en parallèle en raison inverse des résistances. L'homme est traversé par 0,0429 : 3 = 0,014 3 *A*. Cette intensité n'est pas dangereuse.

c) En calculant de la même façon le courant qui traverse l'homme touchant en même temps le fil C et la ferrure, on trouve 0,0571 *A*. Il y a risque d'électrocution.

2. On appelle résistance d'*isolement à la terre* d'une installation électrique la résistance qui s'oppose au passage du courant depuis les conducteurs jusqu'à la terre.

La résistance d'isolement d'une petite installation d'appartement exécutée avec soin atteint un mégohm.

Une centrale électrique alimente en courant continu, sous 220 volts, 5 000 appartements. Quelle est l'isolement par rapport à la terre de l'ensemble du réseau?

3. Les installations électriques dans les salles de bains doivent être très soignées. Les prises de courant, les interrupteurs d'éclairage sont placés à bonne distance de la baignoire. Pourquoi?

4. — ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT ÉLECTRIQUE

18e LEÇON

Étude qualitative de l'électrolyse.

Vous avez vu que le courant électrique décompose une solution de sulfate de cuivre. Il peut produire bien d'autres décompositions chimiques. Nous allons en étudier quelques-unes.

1. Certains liquides sont mauvais conducteurs, d'autres conduisent le courant.

Vous avez constaté que le courant ne passe pas à travers l'eau distillée : *l'eau pure est un isolant.* Il en est de même du pétrole, de l'alcool, de l'essence de térébenthine, etc.

Mais du mercure, du plomb fondu, la solution dans l'eau d'un acide, d'une base, d'un sel laissent passer le courant : ces liquides sont bons conducteurs.

2. Les acides, les bases, les sels, en dissolution ou fondus sont des électrolytes.

Le courant traversant un métal fondu n'y produit aucun phénomène chimique.

Le courant passant dans un liquide provenant de la *fusion* ou de la *dissolution dans l'eau* d'un acide, d'une base ou d'un sel produit une décomposition chimique.

Cette décomposition par le courant se nomme **électrolyse.** Le

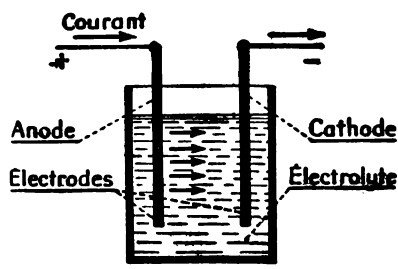


Fig. 1. — Cuve électrolytique ou électrolyseur ou voltamètre.

L'*anode* est le conducteur par lequel le courant *arrive* dans l'électrolyte.

La *cathode* est le conducteur par lequel le courant *sort* de l'électrolyte.

liquide conducteur et décomposable est un *électrolyte*. Les extrémités du conducteur plongeant dans l'électrolyte sont les *électrodes;* celle par laquelle le courant pénètre dans l'électrolyte se nomme *électrode positive* ou *anode;* celle par laquelle le courant sort de l'électrolyte, ***électrode négative*** ou ***cathode***. Le vase dans lequel se fait l'électrolyse est **nommé *voltamètre*, *cuve*** ou ***bac à électrolyse, électrolyseur*** (fig. 1).

3. Premier exemple d'électrolyse : décomposition du chlorure cuivrique dissous.

Expérience. — Dans un tube en U (fig. 2), nous mettons une dissolution concentrée de chlorure cuivrique (Cl_2Cu). Les électrodes sont des tiges de charbon.

Constatez sur l'anode un dégagement de chlore reconnaissable à son odeur, sur la cathode un dépôt rouge de cuivre.

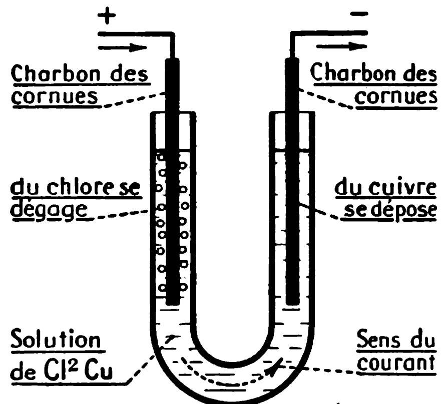
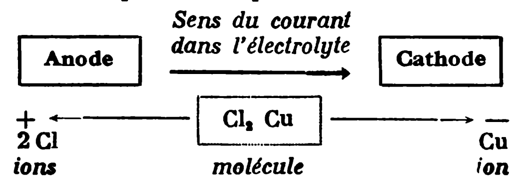


Fig. 2. — Electrolyse du chlorure cuivrique en solution dans l'eau. Du chlore se dégage sur l'anode. Du cuivre se dépose sur la cathode.

On *explique* ces faits en disant que des molécules de chlorure cuivrique Cl_2Cu se scindent dans le liquide en *ions* : des *ions* cuivre qui sont transportés par le courant sur la cathode où ils se déposent, des *ions* chlore Cl qui apparaissent sur l'anode et se réunissent deux à deux pour former des molécules de gaz chlore qui se dégagent.

Le schéma suivant représente le phénomène :



4. Exemples d'électrolyses plus complexes.

1° Électrolyse d'une solution d'acide sulfurique.

Expérience. — Dans un voltamètre à électrodes de platine, nous mettons de l'acide sulfurique étendu au 1/10, nous coiffons les électrodes d'éprouvettes graduées en centimètres cubes pleines d'eau acidulée et nous faisons passer le courant (fig. 3).

Constatez des dégagements gazeux sur les électrodes, alors qu'aucun **phénomène apparent ne se produit au sein du liquide. Le volume**

du gaz produit à la cathode est double de celui qui est produit à l'anode.

A la *cathode*, le gaz recueilli est inflammable; à ses caractères, un chimiste reconnaît que c'est de l'*hydrogène*.

A l'*anode*, le gaz recueilli rallume une allumette que l'on a soufflée et dont l'extrémité est restée rouge : c'est de l'*oxygène*.

Le volume d'hydrogène est double du volume d'oxygène : les deux gaz sont dans la proportion où ils se combinent pour former de l'eau.

On *explique* ainsi l'expérience. Chaque molécule d'acide sulfurique se scinde dans le liquide en ions : l'ion SO_4 et deux ions H. Le courant transporte ces ions, l'un SO_4 à l'anode où il se combine avec l'eau qui

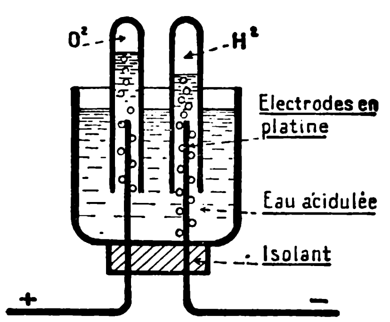


Fig. 3. — Électrolyse de l'acide sulfurique en solution dans l'eau, avec des électrodes inattaquables (platine ou charbon des cornues).
De l'oxygène se dégage sur l'anode.
De l'hydrogène se dégage sur la cathode.

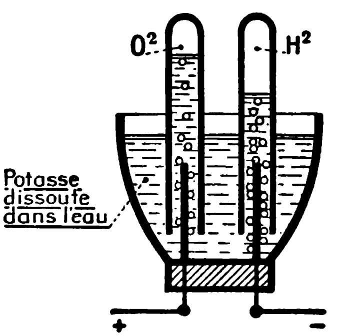
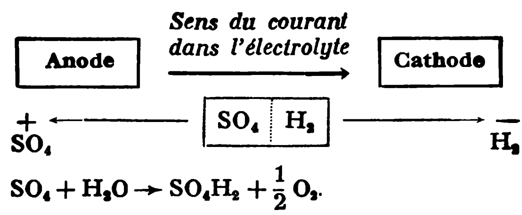


Fig. 4. — Électrolyse de la potasse en solution dans l'eau.
De l'oxygène se dégage sur l'anode.
De l'hydrogène se dégage sur la cathode.

entoure l'électrode pour reconstituer l'acide sulfurique en dégageant de l'oxygène; les autres, les ions hydrogène, à la cathode où le gaz hydrogène se dégage.

Le schéma suivant représente le phénomène :



$$SO_4 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + \frac{1}{2}O_2.$$

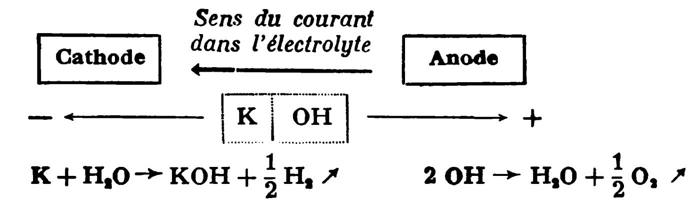
1. Le radical SO_4 n'est pas un corps chimique que l'on puisse isoler, il n'existe qu'à l'état d'ion dans les solutions.

2° *Électrolyse d'une solution de potasse.*

Expérience. — La solution est au 1/10e. Les électrodes sont en fer ou en nickel (fig. 4).

Un dégagement de gaz se produit exclusivement sur les électrodes. On recueille de l'oxygène à l'anode, de l'hydrogène à la cathode, dans la proportion où ces deux gaz forment de l'eau.

Interprétation. — Les deux produits de la décomposition sont K et OH (oxhydrile). A la cathode, K réagit sur l'eau en donnant de la potasse et de l'hydrogène. A l'anode, les oxhydriles OH se combinent entre eux pour former de l'eau en dégageant de l'oxygène.



$$K + H_2O \rightarrow KOH + \frac{1}{2}H_2 \nearrow \qquad 2\,OH \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 \nearrow$$

3° *Électrolyse d'une solution de sulfate de sodium.*

Expérience. — Avec des électrodes de platine, nous obtenons encore de l'hydrogène et de l'oxygène dans la proportion où ces gaz forment l'eau (fig. 5).

Interprétation. Les deux produits de la décomposition son SO_4 et Na qui réagissent sur l'eau comme il a déjà été dit.

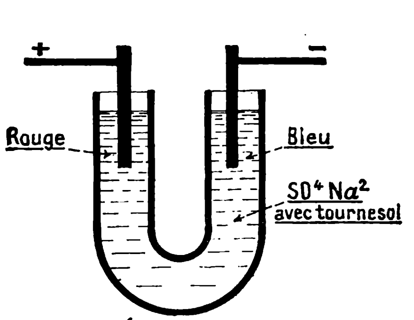


Fig. 5. — Électrolyse d'une solution de sulfate de sodium colorée par du tournesol.
L'acide et la base sont séparés.

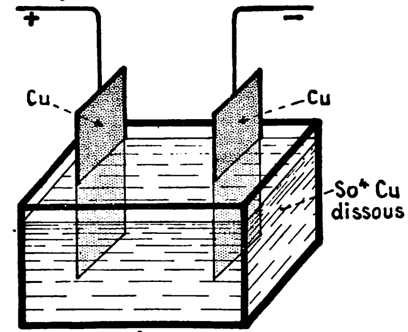


Fig. 6. — Électrolyse du Sulfate de cuivre dissous dans l'eau, avec des électrodes en cuivre.
L'anode diminue de poids; la cathode augmente d'autant.

Recommençons l'électrolyse dans un tube en U après avoir coloré l'électrolyte avec du tournesol violet. Autour de l'anode le tournesol

rougit, montrant la présence d'acide sulfurique, il bleuit autour de la cathode montrant la présence de soude.

Sens du courant dans l'électrolyte →

Anode | **Cathode**

+ ← SO_4 ⁞ Na_2 → —

$SO_4 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + \frac{1}{2} O_2$ $2\,Na + 2\,H_2O \rightarrow 2\,NaOH + H_2$

4° Électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre.

Expérience. — Avec des électrodes de cuivre (fig. 6) vous observez un dépôt de cuivre à la cathode, alors que l'anode se dissout dans le liquide. Il y a transport du cuivre de l'anode à la cathode. La concentration en sulfate de cuivre ne change pas.

Interprétation.

Sens du courant dans l'électrolyte →

Anode | **Cathode**

+ ← SO_4 | Cu → —

$SO_4 + Cu \rightarrow SO_4\,Cu.$ Cu

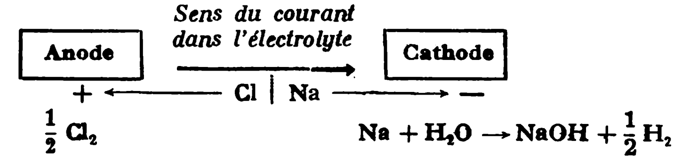
5° Électrolyse du chlorure de sodium dissous.

On emploie des électrodes de charbon, inattaquables par les produits de l'électrolyse.

Suivant les conditions de l'opération, les corps obtenus sont différents.

1° *Les électrodes sont séparées par une cloison poreuse,* qui laisse passer le courant, mais empêche le brassage du liquide.

On obtient du chlore, de l'hydrogène et de la soude



2° *La cuve à électrolyse n'est pas cloisonnée.* La solution de sel marin est étendue et froide, on l'agite pendant l'opération.

A la cathode où se porte le sodium, il se fait de la soude :

$$Na + H_2O \longrightarrow NaOH + \frac{1}{2} H_2.$$

A l'anode, le chlore produit ne se dégage pas, il se dissout dans le liquide brassé et se combine à la soude qui s'y trouve :

$$Cl_2 + 2NaOH \longrightarrow ClONa + ClNa + H_2O.$$

On obtient de l'eau de Javel.

3° *L'électrolyte est concentré et chaud.* Il se forme du chlorate de sodium

$$6\,Cl + 6\,NaOH \longrightarrow ClO_3Na + 5\,ClNa + 3\,H_2O.$$

5. Conclusions : lois qualitatives de l'électrolyse.

Les expériences précédentes, et toutes celles que l'on peut effectuer sur les *acides*, *bases*, *sels*, fondus ou dissous, montrent :

a) *que les produits de l'électrolyse apparaissent seulement sur les électrodes;*

b) *que la décomposition sépare la molécule de l'acide, de la base ou du sel en deux parties appelées ions : le métal ou l'hydrogène qui se porte sur la cathode, le reste de la molécule qui se porte sur l'anode;*

c) *que des réactions secondaires se produisent souvent.*

Par ces réactions secondaires, les ions peuvent :

1° se décomposer (exemple : électrolyse de SO_4H_2);

2° attaquer les électrodes (exemple : électrolyse de SO_4Cu avec électrodes en cuivre);

3° réagir sur le dissolvant (exemple : Na dans l'électrolyse de SO_4Na_2);

4° réagir l'un sur l'autre (exemple : électrolyse de ClNa dissous, sans cloisonnement de la cuve).

Les applications de l'électrolyse sont très nombreuses et très importantes; elles sont sommairement étudiées aux 20e et 21e leçons.

Résumé.

1. — Les liquides sont des isolants, sauf les métaux fondus et les *électrolytes* (acides, bases, sels) fondus ou dissous dans l'eau.

2. — Un électrolyte, fondu ou dissous, est décomposé quand il est traversé par un courant électrique. Cette décomposition se nomme *électrolyse*.

3. — Lois qualitatives de l'électrolyse :

a) Les produits de l'électrolyse n'apparaissent que sur les électrodes.

b) Le métal ou l'hydrogène de l'électrolyte se porte sur la cathode ; le reste de la molécule sur l'anode.

4. — Des *réactions secondaires* se produisent souvent, dues aux propriétés chimiques des produits de la décomposition initiale.

Exercices.

1. Expliquer le fonctionnement du papier cherche-pôles dont il est parlé dans la 5e leçon.

2. Que se produirait-il si l'on électrolysait une dissolution de sulfate de cuivre avec des électrodes de platine ou de charbon?

3. Pour électrolyser de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique, peut-on employer des électrodes de fer? Pourquoi?

4. Une électrolyse intéressante à effectuer est celle du chlorure d'ammonium $ClNH_4$ Elle se fait dans un verre à expériences, la cathode est du mercure, on y amène le courant par un fil de fer protégé par un tube de verre. L'anode est une tige de charbon. L'électrolyte est une solution saturée de $ClNH_4$. Observer les phénomènes et les expliquer.

LECTURE

Les premières expériences d'électrolyse.

La découverte des phénomènes d'électrolyse fut une conséquence presque immédiate de l'invention du premier générateur de courant continu : la pile de Volta.

Le nouvel appareil avait suscité un vif intérêt dans le monde savant. En novembre 1800, Volta *vint à Paris présenter son invention au Premier Consul. Bonaparte fit aussitôt cadeau d'une pile à auges de* 600 *éléments à l'Ecole Polytechnique. A Londres, une pile plus gigantesque encore, de* 2 000 *éléments, fut offerte par souscription publique au grand savant* Humphry Davy. *Et les chercheurs soumirent à l'action du courant électrique les corps les plus divers.*

Dès 1800, *deux Anglais,* Carlisle *et* Nicholson, *qui faisaient passer le courant d'une pile de Volta dans de l'eau acidulée, constatèrent le dégagement aux deux pôles plongés dans le liquide de bulles de gaz qu'ils reconnurent pour de l'hydrogène et de l'oxygène : ils avaient décomposé l'eau à l'aide du courant électrique.*

En 1807, Davy *essaya de faire traverser par du courant électrique un bloc de soude caustique humecté d'eau. A la cathode, il vit apparaître des globules d'un métal jusqu'alors inconnu : le* sodium. *L'année suivante, par le même procédé, il découvrait le* potassium. *Puis ce fut le* calcium *qu'il obtint en électrolysant la chaux humide avec une cathode de mercure, et le* baryum *par l'électrolyse de la baryte.*

Ainsi l'électrolyse révélait aux chimistes plusieurs métaux nouveaux.

L'invention de Volta a donc aussitôt déterminé des progrès importants dans le domaine de la chimie.

Étude quantitative de l'électrolyse.

Dans la leçon précédente, nous avons étudié la nature des produits qui apparaissent au cours d'une électrolyse : nous avons fait une *étude qualitative* de ce phénomène. Nous allons maintenant porter notre attention sur les quantités de ces produits; autrement dit nous allons faire une *étude quantitative* de l'électrolyse.

C'est le physicien anglais *Faraday*[1] qui, le premier, a énoncé les lois quantitives de l'électrolyse.

1. Première loi de Faraday : loi des quantités d'électricité.

1re expérience. — Montons *en série* (fig. 1), un générateur (une batterie de quelques éléments d'accumulateurs), un interrupteur, un ampèremètre de calibre 2 *ampères*, un rhéostat et plusieurs voltamètres à hydrogène.

Ces voltamètres diffèrent par leur taille, leur forme, la nature et la dimension de leurs électrodes, la concentration et même la nature des électrolytes qui peuvent être des solutions dans l'eau d'acide sulfurique, de potasse, de soude, de sulfate de sodium, etc...

a) Fermons l'interrupteur et maintenons constante l'intensité du courant.

Nous constatons au bout d'un certain temps que *la quantité d'hydrogène produite est la même*, par exemple 6 centimètres cubes, *dans chacun des voltamètres.*

Fig. 1. — **Voltamètres en série.** Avec ce montage on établit :
1° que le volume d'hydrogène produit dans les voltamètres par un certain courant, pendant le même temps est le même dans tous les voltamètres ;
2° que ce volume, pour un courant constant, est proportionnel à la durée de l'électrolyse .

Les voltamètres ont été traversés par le même courant pendant le même temps : l'expérience

1. Voir la lecture à la fin de la leçon.

établit que *la quantité d'hydrogène qui s'y dégage ne dépend ni de leur taille ni de leur constitution, ni de leur température.*

b) En conservant constante l'intensité du courant, mesurons le volume d'hydrogène produit dans l'un des voltamètres en 2, 3, 4... *minutes*, nous trouvons, par exemple, 6, 9, 12 *centimètres cubes.*

Nous en concluons que ***la quantité d'hydrogène produite dans une électrolyse par un courant constant est proportionnelle à la durée de passage du courant.***

2e *expérience.* — Disposons trois voltamètres à hydrogène comme l'indique la figure 2.

Après quelques minutes de passage du courant, nous constatons que le volume d'hydrogène dans le voltamètre V_1, soit 10 *cm*³, par exemple, est la somme des volumes d'hydrogène produits dans les voltamètres V_2 (6 *cm*³), et V_3 (4 *cm*³).

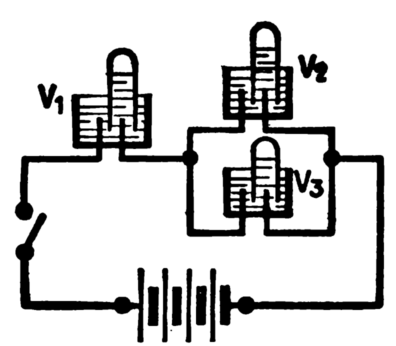


Fig. 2. — Le volume d'hydrogène dans le voltamètre V_1 est la somme des volumes dégagés dans V_2 et V_3.

Vous savez que l'intensité dans le voltamètre V_1 est la somme des intensités dans les voltamètres V_2 et V_3. L'expérience effectuée montre donc que ***la quantité d'hydrogène produite pendant un temps déterminé dans un voltamètre par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant***[1].

Des expériences analogues, dans lesquelles on emploie un autre générateur, des voltamètres avec dépôt d'un même métal à la cathode, par exemple des voltamètres à sulfate de cuivre, conduisent aux mêmes conclusions.

Résumons : La quantité d'hydrogène ou de métal produite dans une électrolyse étant proportionnelle à la durée *t* de l'électrolyse et à l'intensité *I* du courant employé est proportionnelle au produit des deux variables *I* et *t*, c'est-à-dire à la quantité d'électricité *It* qui a traversé le voltamètre.

C'est la première loi de Faraday que l'on peut exprimer de deux façons équivalentes :

1. On pourrait aussi procéder de la façon suivante : faire traverser successivement un voltamètre à hydrogène pendant le même nombre de minutes par des courants d'intensités I_1, I_2, I_3, mesurés avec un ampèremètre et constater que les volumes d'hydrogène obtenus sont proportionnels à I_1, I_2, I_3. L'expérience, plus longue, serait moins précise parce qu'elle comporterait plus de mesures.

La quantité d'hydrogène ou de métal produite dans un voltamètre est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a passé dans le voltamètre.

Ou : la masse d'un électrolyte déterminé décomposée par un courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte.

2. Seconde loi de Faraday : loi des valences.

Expérience. — On monte en série (fig. 3) des voltamètres contenant des électrolytes différents : eau acidulée, azotate d'argent, sulfate de cuivre, chlorure d'or.

Le même courant les traverse.

On mesure les poids d'hydrogène[1], d'argent, de cuivre, d'or produites dans une expérience. On trouve par exemple :

Hydrogène : 0,01 *g*
Argent : 1,08 *g*
Cuivre : 0,315 *g*
Or : 0,65 *g*

H
Voltamètre à eau acidulée
Voltamètre à nitrate d'argent
+
–
Voltamètre à sulfate de cuivre

Fig. 3. — Troisième loi de Faraday.
Les voltamètres sont déposés en série; ils contiennent des électrolytes différents.
Les quantités d'électrolytes décomposées sont différentes.

Pour comparer ces résultats rappelons que l'on appelle ***valence - gramme*** d'un corps simple le quotient de sa masse atomique par sa valence.

L'hydrogène a pour masse atomique 1, c'est un corps monovalent : sa valence-gramme pèse 1 gramme.

L'argent a pour masse atomique 108, c'est un corps monovalent : sa valence-gramme pèse 108 grammes.

Le cuivre a pour masse atomique 63, il est bivalent dans le sulfate de cuivre : sa valence-gramme pèse 31,5 grammes.

L'or a pour masse atomique 197, il est trivalent dans le chlorure d'or : sa valence-gramme pèse 65,7 grammes.

1. On recueille l'hydrogène dans un tube gradué. On mesure son volume. On sait que 1 cm^3 d'hydrogène sous la pression atmosphérique et à la température ordinaire, pèse environ $\frac{2}{22,4}$ *mg*. On peut donc calculer le poids de l'hydrogène recueilli.

On voit que, dans l'expérience décrite, on a obtenu, dans chaque voltamètre, 0,01 de valence-gramme du métal ou de l'hydrogène apparu à la cathode.

Concluons :

Quand le même courant traverse plusieurs électrolytes différents, il libère dans chacun d'eux le même nombre de valences-grammes.

La loi peut s'énoncer aussi : **la quantité d'électricité nécessaire pour libérer par l'électrolyse une valence-gramme est indépendante de la nature de l'électrolyte.**

3. Quantité d'électricité nécessaire pour libérer une valence-gramme.

On l'a mesurée avec soin en électrolysant une solution de nitrate d'argent. Vous imaginez comment l'on procède.

On fait passer un courant bien constant dans un voltamètre analogue à celui de la figure 4.

1° On mesure l'intensité I du courant avec un ampèremètre précis, soit

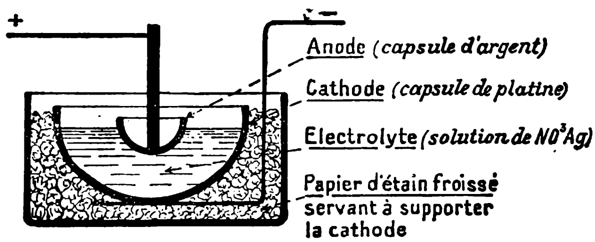


Fig. 4. — Mesure de la quantité d'électricité nécessaire pour libérer une *valence-gramme* d'argent.

par exemple $I = 0,25$ *ampère*, et, avec un chronomètre, la durée de passage de ce courant, soit $t = 1\,800$ *secondes*.

On a ainsi utilisé :

$$0,25 \times 1\,800 = 450 \textit{ coulombs}.$$

2° On pèse, avec une balance sensible l'augmentation de masse de la cathode, c'est-à-dire la masse d'argent déposée, soit 0,503 *gramme*.

Pour déposer une valence-gramme, il faut donc :

$$\frac{450 \times 108}{0,503} = \textbf{96 600 coulombs}.$$

Un ampère fournit un coulomb par seconde; il dépose :

$$108 : 96\,600 = 0,001\,118 \textit{ gramme d'argent par seconde}.$$

D'où cette définition *électrochimique* de l'ampère, en usage avant la définition *électrodynamique* donnée dans la 6e leçon et actuellement légale :

L'ampère est l'intensité du courant qui dépose par seconde 1,118 *milligramme d'argent d'une solution d'azotate d'argent dans l'eau.*

Résumé.

Les lois quantitatives de l'électrolyse sont dites *lois de Faraday*.

1re Loi. **La masse d'un électrolyte déterminé décomposée par un courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte.**

2e Loi. **La quantité d'électricité nécessaire pour libérer par électrolyse une valence-gramme est indépendante de la nature de l'électrolyte.**

Pour libérer une valence-gramme, il faut 96 600 *coulombs*.

Un ampère dépose par seconde 1,118 *mg* d'argent d'une solution dans l'eau de nitrate d'argent.

Exercices.

1. La formule du sulfate de nickel est SO_4Ni. Le poids atomique du nickel est 58,6. Calculer la valence-gramme du nickel.

2. Un voltamètre à hydrogène et un voltamètre à argent sont montés en série. Quel volume d'hydrogène aura-t-on recueilli quand il sera déposé 1 *g* d'argent?

3. Établir la formule suivante qui résume les deux lois de Faraday :

$$m = \frac{a.I.t}{v.\ 96\ 600}$$

dans laquelle m est la masse en *grammes* du métal déposé, a la masse atomique et v la valence de ce métal, I l'intensité en *ampères* et t la durée en *secondes* de l'électrolyse.

Montrer que, dans le cas de l'hydrogène, le volume de gaz produit et mesuré dans les conditions normales est

$$V = 0{,}115 . I . t$$

V est exprimé en cm^3, I en *ampères* et t en *secondes*.

LECTURE — FARADAY (1791-1867).

Faraday n'était pas, comme Coulomb ou Ampère, un savant mathématicien. Mais c'était un expérimentateur merveilleux, d'une adresse incomparable. Il passait toutes ses journées à son laboratoire, s'y rendant le matin, n'en sortant que le soir.

Né près de Londres, de parents très pauvres, il n'avait reçu qu'une instruction très élémentaire. A treize ans, il fut placé comme apprenti chez un libraire. Il eut l'heureuse fortune, huit ans après, d'assister à quelques leçons de chimie de l'illustre **Davy**[1]***; il en fut enthousiasmé et écrivit à Davy une lettre le priant de l'aider à quitter le commerce qu'il détestait pour se vouer à la Chimie qu'il aimait.***



Fig. 4. — Faraday (1791-1867), illustre savant anglais.

Davy[1] ***montre la lettre à un savant de ses amis :***

« Que faire de ce jeune homme ?

— Qu'en faire, répond l'autre. Le mettre à laver les verres et les tubes à essais du laboratoire. S'il est bon à quelque chose. Il le fera avec empressement; s'il refuse, c'est qu'il n'est bon à rien! »

« Conseil tout anglais, fruit d'une grande pratique des hommes — ajoute **Dumas**[2] ***qui rapporte ce trait. — Je ne chercherais pas loin mes exemples et je n'aurais qu'à me souvenir s'il fallait prouver qu'on arrive plus tôt à l'Académie des sciences en commençant au laboratoire par laver les verres qu'en y débutant avec prétention, comme un génie qui dédaignerait le matériel des expériences. »***

1. *Davy*, savant chimiste anglais, qui inventa, entre autre, la lampe de sûreté des mineurs (1778-1829).

2. *Dumas*, chimiste français, qui a notamment déterminé les poids atomiques d'un grand nombre de corps simples (1800-1884).

Applications industrielles de l'électrolyse : Electrométallurgie.

1. L'électrolyse est un phénomène d'importance industrielle.

On utilise les effets chimiques du courant électrique.

1° ***Pour préparer des produits chimiques*.** Par exemple, l'électrolyse du chlorure de sodium fournit, suivant les conditions opératoires du chlore, du sodium, de la soude, de l'hypochlorite de sodium (eau de javel), du chlorate, du perchlorate de sodium. Ces préparations sont étudiées dans les cours de chimie.

2° ***Pour produire industriellement des métaux*.** Nous étudierons comme exemple la métallurgie de l'aluminium.

3° ***Pour affiner des métaux*** à partir de métaux impurs (cuivre, fer).

4° ***Pour produire des dépôts métalliques***, soit non adhérents à la cathode (galvanoplastie), soit adhérents (cuivrage, nickelage, chromage, cobaltage, cadmiage, argenture dorure).

2. L'aluminium se fabrique uniquement par électrolyse.

a) ***Principe*.** On électrolyse l'alumine fondue

$$Al_2O_3 \longrightarrow 2\,Al + \frac{3}{2}\,O_2.$$

Or, l'alumine ne fond qu'à 3 000°. Pour éviter l'emploi d'une température aussi élevée, on dissout l'alumine dans de la cryolithe (AlF_3, $3NaF$) fondue à 950° .La cryolithe est un fluorure double d'aluminium et de sodium, qui existe en gisements abondants au Groenland et que l'on produit aussi artificiellement à partir de l'alumine et de l'acide fluorhydrique.

b) ***Minerai*.** Le seul minerai d'aluminium exploité est la *bauxite*. En France, on la trouve dans les Bouches-du-Rhône, l'Hérault, le Var, les Pyrénées-Orientales. La bauxite est de l'alumine impure : elle contient de la silice et de l'oxyde de fer.

Pour obtenir de l'aluminium a un degré de pureté satisfaisant, il faut

électrolyser de l'alumine pure. La bauxite est chauffée au rouge dans un four à réverbère avec du carbonate de sodium. Le produit de la calcination, lessivé, fournit une dissolution d'aluminate de sodium (O_3Al_2, $3ONa_2$) peu stable. On précipite l'alumine, soit par un courant de gaz carbonique, soit en mettant dans le liquide des cristaux d'alumine hydratée qui suffisent à amorcer la décomposition. L'oxyde obtenu est lavé, puis calciné, pour obtenir l'alumine anhydre.

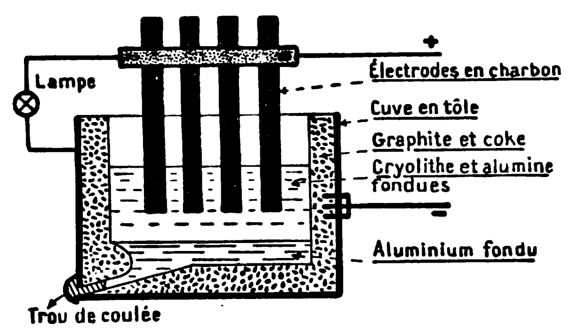


Fig. 1. — **Schéma de four pour** préparation **de l'aluminium** par électrolyse.
Intensité : 10 000 à 30 000 ampères.
Tension : 10 volts

c) ***Cuve à électrolyse*** (fig. 1). C'est une cuve de deux ou trois mètres cubes dont l'intérieur, garni de graphite et de coke, forme la cathode. L'anode est constituée par de gros cylindres de charbon.

d) ***Marche de l'opération.*** Un mélange d'alumine et de cryolithe est placé dans le four. Un courant, dont l'intensité atteint de 10 000 à 30 000 ampères, fond par chaleur Joule la cryolithe et l'alumine à 950°. L'électrolyse commence. La tension est réglée à 10 volts. L'alumine se décompose. Quand sa proportion dans le bain diminue, la tension monte et la cryolithe s'électrolyse à son tour en dégageant du fluor. C'est une perte qu'il faut éviter en ajoutant de l'alumine dans la cuve. Une lampe pour tension de 10 volts, montée entre anode et cathode, s'éclaire vivement quand la tension d'électrolyse est trop grande et indique aux ouvriers qu'il est nécessaire d'ajouter de l'alumine. En principe, la cryolithe sert indéfiniment.

L'aluminium, un peu plus dense que l'électrolyte, se rassemble dans le fond de la cuve. On le recueille par un trou de coulée.

3. Les métaux légers sont obtenus par électrolyse de leurs chlorures fondus.

Ces métaux prennent une importance industrielle de plus en plus grande en raison de leurs applications à la construction des avions.

Le *magnésium* (d = 1,7 *g/cm*³) est préparé par électrolyse du chlorure de magnésium, Cl_2Mg, ou mieux de la carnallite fondue Cl_2Mg, ClK, $6H_2O$.

Le *calcium* (d = 1,6 *g/cm*³) est obtenu par électrolyse du chlorure de calcium fondu Cl_2Ca; on utilise une cuve cylindrique à revêtement de graphite et une électrode centrale en fer sur laquelle le métal se dépose.

4. Le cuivre destiné aux applications électriques est purifié par électrolyse.

Le cuivre pur conduit beaucoup mieux le courant que le cuivre brut obtenu en métallurgie par réduction d'un minerai à haute température. Cette infériorité du cuivre brut est due à des traces d'impuretés : oxygène, soufre, arsenic, fer, zinc, plomb, argent, or, etc.

C'est par un *affinage électrolytique* qu'on purifie le cuivre brut. Il est fondu et moulé en plaques qui servent d'anodes pour l'électrolyse du sulfate de cuivre; les cathodes sont, au début de l'opération, des feuilles minces de cuivre pur. Le courant transporte le cuivre de l'anode, qui disparaît peu à peu, à la cathode qui grossit. Certaines impuretés (S, Pb, Ag, Au) tombent au fond de la cuve; d'autres (Fe, Zn) se dissolvent dans le bain.

On emploie des anodes à 99 % de cuivre. On obtient des cathodes à 99,9 de ce métal; il reste un peu de fer et d'oxygène. Ces cathodes sont fragiles; elles sont fondues avant transport.

4. On fabrique aussi du fer électrolytique.

Le fer de grande pureté est utilisé pour ses propriétés magnétiques.

On prépare du fer électrolytique en électrolysant du sulfate ferreux avec pour anode une gueuse de fonte et pour cathode une feuille de tôle.

Exercices.

1. Pour raffiner du cuivre, on dispose d'un courant de 1 000 *A*. Quel poids de cuivre obtiendra-t-on à l'heure?

Le cuivre est bivalent et sa masse atomique est 63,6.

2. Un four à aluminium absorbe 20 000 *A* sous 10 *V*. Un cinquième de l'énergie compense les pertes en chaleur de la cuve.

Combien l'installation produit-elle d'aluminium à l'heure? L'aluminium est trivalent et sa masse atomique est 27.

Combien consomme-t-on de *kWh* par kilogramme d'aluminium produit?

Applications industrielles de l'électrolyse : Dépôts métalliques adhérents. Galvanoplastie.

I. Dépôts métalliques adhérents.

Pour protéger certains objets métalliques *contre l'oxydation* et leur donner en même temps un *aspect agréable*, on les recouvre par électrolyse d'une couche mince (0,001 à 0,025 *mm*) d'un métal peu altérable, voire d'un métal précieux. C'est le but du *nickelage*, du *chromage*, du *cobaltage*, du *cadmiage*, de l'*argenture*, de la *dorure*.

Il faut que le métal déposé adhère solidement au métal sous-jacent et que le dépôt ait belle apparence.

1. La qualité d'un dépôt électrolytique dépend de nombreux facteurs.

1° ***De l'état de la surface du corps*** sur lequel on effectue le dépôt : cette surface doit être rigoureusement propre, sans traces d'oxydation ni de graisse. On commence donc par polir, décaper, dégraisser l'objet à métalliser.

Nickel, argent et or n'adhèrent bien qu'au cuivre. Si donc l'objet est en fer ou en zinc, il convient de le cuivrer.

Le chromage se fait sur nickelage préalable.

2° ***De la composition du bain d'électrolyse.*** Cette composition est complexe en général, sans que l'on puisse souvent expliquer le rôle de tel ou tel constituant.

3° ***De la densité du courant.*** Les faibles densités donnent des dépôts très adhérents, mais le métal cristallisé est de vilain aspect. Si l'intensité est grande, le dépôt se fait en une boue non adhérente.

4° ***De la température du bain.*** Les résultats obtenus sont souvent meilleurs si l'électrolyte est un peu chauffé.

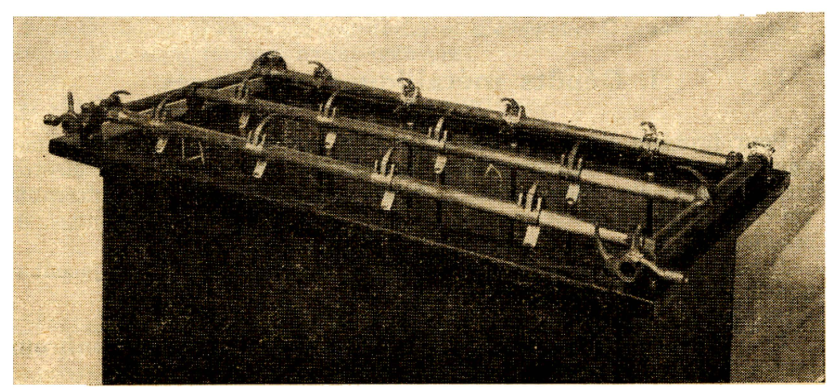
Il y a intérêt aussi à brasser le bain en y soufflant de l'air ou en le faisant circuler dans la cuve et l'obligeant à traverser des filtres.

2. La préparation des pièces qui doivent recevoir les dépôts métalliques exige beaucoup de soins.

Elle comporte des opérations mécaniques et chimiques.

a) Préparation mécanique. **— Les pièces venant de fabrication sont polies, d'abord avec des disques de bois ou de cuir émerisés, puis avec du drap imprégné d'un abrasif à grain très fin.**

b) Préparation chimique. **— Le dégraissage s'obtient en plongeant la pièce dans une solution chaude de carbonate de sodium à laquelle on ajoute de la chaux, ou dans une solution de soude caustique.**



Cliché de la Société Pernix.

Fig. 1. — **Cuve à électrolyse** équipée avec des dispositifs auto-serreurs assurant de bonnes connexions.

A chaque bout de la cuve est une barre isolée par laquelle le courant est amené.
Trois barres parallèles aux grands côtés de la cuve supportent : celle du milieu, les objets à métalliser (barre cathode); celles des bords, les anodes (barres anodes).
Chaque barre, cathode ou anode, est connectée, à l'une de ses extrémités, à l'une des barres d'amenée du courant.

On préfère actuellement dégraisser par électrolyse. Les pièces sont mises comme cathodes dans une solution de soude caustique (5 %) et de cyanure de sodium[1] (4 %) avec une densité de courant de 7 à 10 ampères par décimètre carré (A/dm^2).

Les objets, rincés à l'eau courante, sont décapés dans de l'acide chlorhydrique (10 %), lavés et transportés dans le bain où se fait le dépôt.

1. Le cyanure de sodium ou de potassium est un poison très violent, fort dangereux à manipuler.

Les différentes opérations, électrolytiques ou non, sont effectuées dans des cuves disposées les unes à côté des autres, en *train*, dans l'ordre des opérations que les pièces ont à subir.

Une barre cathode, portant les objets à métalliser, subit toute la gamme des opérations, jusqu'à un poste terminus où elle est dégarnie. Elle est ensuite regarnie d'objets et remise en circuit.

Pour les petites productions, le transport des barres cathodes d'une cuve à la suivante est opéré à la main. Pour les productions importantes, il est effectué par des appareils de manutention semi-automatiques.

Les cuves ont une largeur et une profondeur standards et une longueur proportionnée à la durée de l'opération.

3. Cuivrage.

Le sulfate de cuivre en solution ne peut servir que pour les métaux (laiton, plomb) qui ne précipitent pas le cuivre de ses sels. Pour cuivrer le zinc, le fer, l'acier, on emploie de l'acétate, du tartrate ou du cyanure de cuivre auxquels on ajoute du cyanure de sodium (au total environ 150 grammes de sels par litre).

La densité du courant atteint 0,5 A/dm^2 de surface à cuivrer. L'anode est une plaque de cuivre rouge.

Dégraissage électrolytique et cuivrage s'effectuent parfois en une seule opération en mélangeant dans le même bain soude, cyanure de cuivre et cyanure de sodium.

4. Nickelage.

Un bain de nickelage est fait de :

Sulfate de nickel..................	220 grammes par litre.
Chlorure de nickel................	20 grammes par litre.
Acide borique	20 grammes par litre.

Il est chauffé à 35°. La densité de courant est de 5 à 10 A/dm^2. L'anode est constituée par des plaques de nickel pur.

La suite des opérations est la suivante :

Dégraissage-cuivrage.
Rinçage en eau courante.
Attaque en solution chlorhydrique.
Rinçage répété en eau courante.
Nickelage à chaud en bain agité et filtré.
Rinçage en eau froide et eau chaude.
Séchage en étuve.

Le nickelage se fait aussi à froid, beaucoup plus lentement, avec une densité de 0,5 A/dm^2.

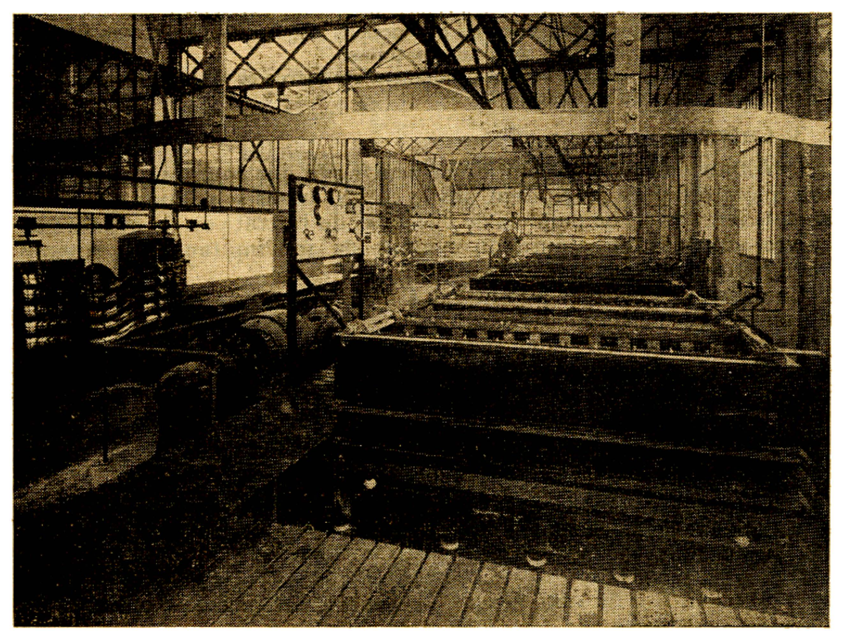
5. Chromage.

Les pièces sont d'abord nickelées.

Le bain de chromage se prépare avec 250 grammes par litre d'anhydride chromique (CrO_3) et 30 grammes d'acide sulfurique. Il est chauffé

vers 30°. L'anode est insoluble, généralement en plomb. La densité de courant est de 10 à 15 A/dm^2.

Des vapeurs dangereuses d'hydrogène et d'anhydride chromique se dégagent de la cuve, il faut les évacuer avec un ventilateur.



Cliché de la Société Pernix.

Fig. 2. — Train semi-automatique de nickelage et de chromage.
Lescuves sont disposées dans l'ordre de leur utilisation.
Elles sont isolées électriquement du sol au moyen de blocs de porcelaine afin d'éviter la circulation de « *courants vagabonds* » qui se transmettent par la terre.
Remarquer à gauche les dynamos génératrices et un tableau de distribution; et, au-dessus des cuves, les rails pour le transport des barres cathodes d'une cuve à la suivante.

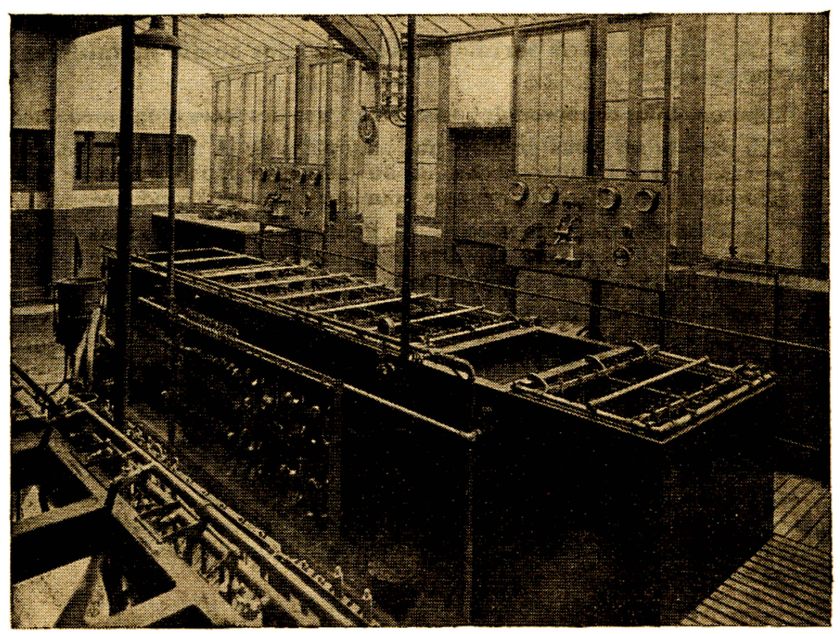
On réalise des dépôts de nickel et de chrome ayant jusqu'à 2 millimètres d'épaisseur s'il est nécessaire pour recharger des pièces mécaniques usées. Ces dépôts sont très durs et résistent bien à l'usure. La recharge au chrome de calibres à tolérance est une opération courante dans certaines usines.

Le nickelage et le chromage sont actuellement très employés.

La fig. 2 représente un train semi-automatique de nickelage et de chromage.

6. Argenture.

L'argent adhère mieux au cuivre sous-jacent si le cuivre a été un peu amalgamé. C'est après dégraissage que les objets en cuivre ou cuivrés sont plongés pendant quelques secondes dans une dissolution à 1 % de



Cliché de la Société Pernix.

Fig. 3. — Train de nickelage pour objets volumineux, tels que chauffe-bains, réservoirs de motocyclette, meubles en tubes, calandres de radiateurs.

Observer les anodes disposées longitudinalement et transversalement pour obtenir une répartition judicieuse du courant, assurant un dépôt métallique d'épaisseur aussi uniforme que possible.

nitrate de mercure. Ils blanchissent rapidement. On les rince et on les porte dans le bain d'argenture.

Ce bain est une dissolution de cyanure double d'argent et de potassium à 10 grammes par litre. L'anode est une plaque d'argent pur. La densité de courant est de 0,5 A/dm^2.

Le dépôt obtenu est mat. On le rend brillant en le frottant avec un brunissoir d'acier.

7. Dorure.

Le bain est une solution de chlorure d'or et de cyanure de potassium (par litre : 3 à 5 grammes de chlorure d'or, 5 à 7 grammes de cyanure).

L'anode est un fil de platine. L'électrolyse se pratique vers 70° avec une densité de courant de 0,1 A/dm^2.

II. Galvanoplastie.

8. La galvanoplastie permet de fabriquer des objets métalliques par électrolyse.

Proposons-nous de reproduire, en cuivre, l'une des faces d'une médaille.

a) *Moulage.* Nous prenons une empreinte de la médaille avec de la cire, ou de la gutta-percha, ou du plâtre fin gâché très clair. La médaille a été huilée au préalable pour que le moule n'y adhère pas.

b) *Métallisation du moule.* — Pour que le moule puisse servir de cathode, il faut que sa surface au moins soit conductrice. Nous la frottons avec de la plombagine.

c) *Production du dépôt.* — Dans une solution de sulfate de cuivre au dixième, acidulée par un peu d'acide sulfurique, nous plongeons une anode en cuivre et le moule qui sert de cathode. La densité du courant est d'abord maintenue très faible (0,2 A/dm^2 de cathode), puis portée à 2 ou 3 A/dm^2. La source de courant est une pile ou un élément d'accumulateur. Nous obtenons un dépôt de 1 millimètre d'épaisseur en 6 heures.

C'est par un procédé analogue que l'on fabrique les clichés d'imprimerie à partir des planches gravées, ou les moules pour disques de phonographe. Au lieu de cuivre, on peut déposer un métal plus dur : du fer ou du nickel.

III. Rendement des électrolyses industrielles

9. Les bains d'électrolyse sont généralement, comme nous venons de le voir, des mélanges d'électrolytes. Le courant qui les traverse libère parfois, avec le métal dont on cherche le dépôt, de l'hydrogène produit par l'action sur l'eau du bain du potassium ou du sodium qui tendent à se former à la cathode.

Il en résulte que pour obtenir le dépôt d'une valence-gramme du métal désiré, il faut faire passer dans la cuve plus que les 96 600 coulombs théoriquement nécessaires. Le rapport du poids du métal effectivement déposé au poids théorique correspondant à la quantité d'électricité utilisée est le rendement de l'opération.

Ce rendement est particulièrement faible pour le chromage : il ne dépasse pas 12 à 15 %.

Pour l'affinage électrolytique du cuivre, il atteint 95 %.

10. L'épaisseur des dépôts usuels de nickelage et de chromage est très faible : elle est de l'ordre de 50 *microns* pour un nickelage soigné sur cuivre, dont 25 de nickel; une couche de chrome de 1 *micron* peut être considérée comme suffisante.

Exercices.

1. Un bon dépôt d'argent correspond à 3,5 *g/dm²*. Combien dure l'électrolyse qui produit ce dépôt avec une densité de courant de 0,5 *A/dm²?* On admet que le rendement de l'opération est 100 %.

2. Une opération de chromage dure 10 minutes avec une densité de courant de 7 ampères par *dm²*. Le chrome est trivalent, sa masse atomique est 52, sa densité 6,92 *g/cm³* Quelle est l'épaisseur de la couche de métal déposée. Le rendement est 12 %.

3. L'intensité étant de 0, 5 *A/dm²* de surface de cathode, une épaisseur de 1 centième de millimètre de nickel est obtenue en deux heures dans une opération de nickelage à froid. Quel est le rendement de l'opération ? Le nickel est bivalent, sa masse atomique est 58, sa densité 8,6 *g/cm³*.

4. La production prévue d'un atelier de nickelage est de 2 *kg* de nickel par journée de 8 heures. De quelle intensité de courant faut-il disposer?

5. On désire recouvrir l'une des faces d'une plaque de cuivre de 200 × 250 *mm* d'une couche d'argent de 0,1 *mm* d'épaisseur. L'argent a pour densité 10,5 *g/cm³* son poids atomique est 108, il est monovalent. Le rendement de l'électrolyse est 0,75.

L'opération nécessitera combien d'ampères-heures?

Pour que le dépôt soit bien adhérent, une densité de courant de 0,5 A par décimètre carré est recommandée. Combien de temps durera l'électrolyse?

6. Quand on affine le cuivre brut, pour éviter le dépôt des divers métaux constituant des impuretés, on ne dépasse pas une tension de 0,5 V par bac, produisant une densité de courant de 2 *A/dm²*. Les cathodes sont retirées des cuves quand l'épaisseur du cuivre déposé atteint 2 *cm*. L'électrolyse se continue nuit et jour, son rendement atteint 0,95.

Calculer :

1° Combien de temps une cathode reste dans le bac à électrolyse;

2° Quelle est l'énergie électrique consommée dans le bac pour affiner 1 *kg* de cuivre?

Le cuivre a pour densité 8,8 *g/cm³*, sa masse atomique est 63, il est bivalent.

5. PILES ÉLECTRIQUES

22e LEÇON

Propriétés des générateurs Force électromotrice

1. Qu'est-ce qu'un générateur électrique?

C'est un appareil capable d'entretenir un courant électrique dans le circuit obtenu en réunissant ses bornes par une suite de conducteurs.

Le générateur entretient une différence de potentiel entre ses bornes et **fournit de l'énergie aux récepteurs installés dans le circuit qu'il alimente.**

Les générateurs actuels de courant continu sont les piles, les accumulateurs et les dynamos :

— une ***pile*** ou un ***accumulateur*** sont le siège de réactions chimiques. La pile s'use, l'accumulateur se décharge;

— une ***dynamo*** doit être entraînée par un moteur qui lui fournit de l'énergie mécanique.

Un générateur ne crée pas d'énergie; il transforme de l'énergie chimique ou mécanique en énergie électrique.

2. La force électromotrice d'un générateur est mesurée par la tension entre ses bornes à circuit ouvert.

Expérience. — Voici un élément de ***pile Leclanché*** (fig. 1), il est constitué de deux électrodes de natures différentes, l'une est

une plaque de charbon placée dans un vase cylindrique de porcelaine poreuse au milieu d'un mélange de bioxyde de manganèse et de charbon des cornues en poudre[1]. L'autre est un bâton de zinc.

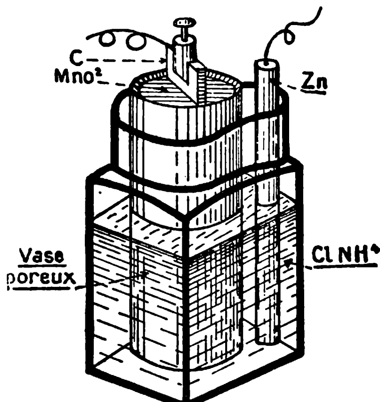


Fig. 1. — Pile Leclanché à vase poreux.

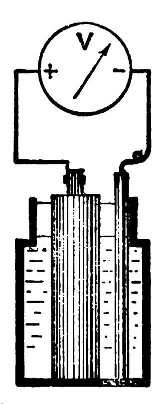


Fig. 2. — Mesure de la force électromotrice d'une pile. Le charbon est le *pôle positif*; le zinc, le *pôle négatif*.

Vase poreux et zinc sont plongés dans une solution concentrée de chlorure d'ammonium ($ClNH_4$) (200 g par litre), contenue dans un récipient en verre.

Branchons un voltmètre polarisé entre les deux électrodes. Nous constatons qu'il dévie et indique une tension de 1,5 *volt*. Le pôle positif de l'élément est le charbon, son pôle négatif le zinc (fig. 2),

On donne à la tension entre les bornes d'un générateur à *circuit ouvert*, on dit aussi *à vide* parce qu'il n'y a pas de courant, le nom de ***force électromotrice*** (en abrégé f. é. m.). On la désigne par la lettre E.

La valeur de sa f. é. m. est une des propriétés caractéristiques du générateur. En effet si nous branchons un voltmètre aux bornes d'une batterie d'accumulateurs nous trouvons 6 V, aux bornes d'une certaine dynamo 110 V.

3. La tension aux bornes d'un générateur diminue lorsqu'il débite.

Expérience. — Faisons débiter l'élément Leclanché sur un rhéostat. Il est branché comme l'indique la figure 3. Un ampèremètre mesure le courant dans le circuit, un voltmètre est en dérivation entre les bornes de la pile.

1. Le bioxyde de manganèse seul est mauvais conducteur, le charbon des cornues est conducteur.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le voltmètre indique 1,5 *volt,* c'est la f. é. m. de l'élément de pile.

Fermons l'interrupteur, la pile débite un courant. On dit qu'elle est *en charge.* Lisons rapidement[1] le voltmètre et l'ampèremètre : I = 0,25 A. U = 1,15 V.

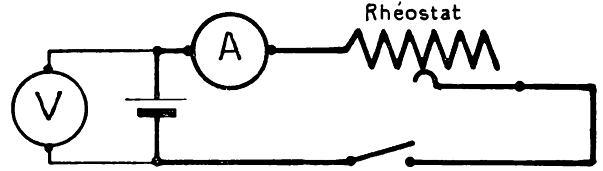


Fig. 3. — Montage d'une pile Leclanché débitant dans un rhéostat.

Diminuons la résistance du rhéostat, l'intensité croît; pour I = 0,5 A la tension est U = 0,8 V; pour I = 0,75 A, U = 0,45 V.

Ainsi la *tension aux bornes de la pile*[2] *en charge est inférieure à la tension à vide,* c'est-à-dire à la force électromotrice. Cette tension diminue quand l'intensité débitée augmente.

On appelle ***chute interne de tension u*** la différence entre la force électromotrice E et la tension aux bornes en charge U.

u	=	E	—	U
chute interne de tension		*f. é. m.*		*tension aux bornes*

Pour :	I = 0,25 A	u = 1,5 — 1,15 = 0,35 V
	= 0,5 A	u = 1,5 — 0,8 = 0,7 V
	= 0,75 A	u = 1,5 — 0,45 = 1,05 V.

La chute interne de tension est proportionnelle à l'intensité du courant débité.

4. C'est la résistance du générateur qui est la cause de la chute interne de tension.

Le quotient u : I, analogue à une résistance, mesure la ***résistance intérieure*** de la pile. En effet, lorsqu'un générateur débite, le courant, qui traverse le récepteur du pôle + au pôle —, traverse aussi le générateur du pôle — au pôle +. C'est dire, qu'à l'intérieur de la pile, le courant va du zinc au charbon à travers la solution de chlorure d'ammonium.

La résistance intérieure représente la résistance électrique de cette colonne d'électrolyte. Elle est assez importante dans le cas d'une

1. Il ne faut laisser l'interrupteur fermé que le temps nécessaire aux lectures; pour éviter que les mesures ne soient faussées par le phénomène de **polarisation** que nous étudierons dans la 23e leçon.

2. Une *pile* est en principe formée de *plusieurs éléments* convenablement associés. Mais on étend souvent le nom de *pile* à *un seul élément.*

pile à vase poreux, car la section de passage du courant est réduite dans les pores du vase. Pour la pile étudiée sa valeur est

$$r = 0{,}7 : 0{,}5 = 1{,}4 \; ohm.$$

Si le générateur est une dynamo, la résistance intérieure représente la résistance électrique des conducteurs du bobinage de cette machine.

5. Loi d'Ohm appliquée à un générateur.

Nous avons les relations :

$$u = E - U \qquad \text{et} \qquad u = rI$$

soit $rI = E - U$ qui peut s'écrire :

$$\boxed{\mathbf{U = E - rI}} \qquad (1)$$

sous cette forme, elle traduit la ***loi d'Ohm appliquée à un générateur.***

Mais la tension U aux bornes du générateur est également la tension aux bornes du circuit d'utilisation. Si le générateur débite dans un *circuit uniquement résistant* de résistance R, la tension U aux bornes du circuit d'utilisation est égale à RI. On a donc :

$$U = RI = E - rI \qquad \text{soit} \qquad E = RI + rI$$

$$\boxed{\mathbf{E = (R + r)I}} \qquad (2)$$

6. Une autre définition de la force électromotrice.

Nous avons étudié jusqu'à maintenant un générateur particulier la pile Leclanché, c'est-à-dire un générateur utilisant l'énergie chimique; mais nos conclusions sont applicables à tous les générateurs.

Considérons, par exemple, un générateur utilisant l'énergie mécanique, une *dynamo*. Elle est caractérisée par sa force électromotrice E et sa résistance interne r.

En fonctionnement, lorsqu'elle débite un courant I la tension entre ses bornes est U et la chute interne de tension est :

$$E - U = rI.$$

Les enroulements s'échauffent par effet Joule; pendant un temps t une quantité d'énergie rI^2t *joules* est transformée en chaleur à l'intérieur de la dynamo.

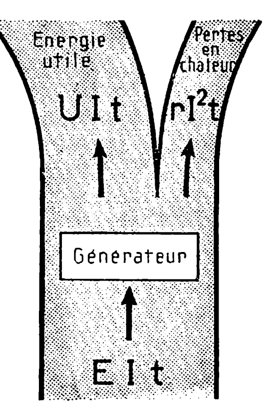


Fig. 4. — **Bilan énergétique du fonctionnement d'un générateur.**

Mais nous savons que, pendant le même temps, la dynamo fournit au circuit extérieur une énergie U I *t* *joules*. Ces énergies sont produites à partir de l'énergie mécanique, nous avons donc (fig. 4) :

$$\text{énergie mécanique transformée} = \mathrm{UI}t + r\mathrm{I}^2t$$

$$\mathrm{W} = (\mathrm{U} + r\mathrm{I}).\mathrm{I}t = \mathrm{E}.\mathrm{I}t.$$

Le produit I*t* est la quantité d'électricité Q qui a traversée la dynamo

$$\underset{volts}{\mathrm{E}} = \frac{\mathrm{W}\ \textit{joules}}{\mathrm{Q}\ \textit{coulombs}}$$

La force électromotrice d'une dynamo mesure l'énergie qui disparait de la forme mécanique et est fournie sous forme électrique à chaque coulomb qui la traverse.

De même pour une pile la f. é. m. mesure l'énergie qui disparaît de la forme chimique. Plus généralement :

La force électromotrice E d'un générateur mesure l'énergie électrique cédée à chaque coulomb qui le traverse.

En résumé, *chaque coulomb*, pendant la traversée du générateur,
reçoit une énergie. . . . . E
perd par effet Joule . . . . rI
il emporte donc en dehors du générateur . . . . $\mathrm{U} = \mathrm{E} - r\mathrm{I}$
Il perd cette énergie dans le circuit extérieur.

7. Rendement industriel et rendement électrique d'un générateur.

Le tableau suivant montre les transformations de 1 000 *kilowatt-heures* d'énergie mécanique fournis à une dynamo par le moteur qui l'entraîne.

ÉNERGIE FOURNIE		ÉNERGIES PRODUITES		
kWh				*kWh*
1 000	Énergie mécanique fournie à la dynamo	Énergie mécanique, transformée en chaleur par frottement (paliers, balais, ventilation)		40
		Énergie mécanique transformée en énergie électrique : 960 *kWh*	Énergie électrique transformée en chaleur à l'intérieur de la dynamo	65
			Énergie électrique fournie au circuit extérieur	895
		TOTAUX		
1 000	⟵ Énergie fournie = Énergies produites ⟶			1 000

Pour fournir 895 kWh d'énergie électrique utile, la dynamo absorbe 1 000 kWh d'énergie mécanique.

Le ***rendement industriel*** de cette machine, rapport de l'énergie utile qu'elle fournit à l'énergie qu'elle reçoit, est ici :

$$\frac{895}{1\,000} = 0{,}895 \quad \text{ou} \quad 89{,}5\ \%.$$

Mais on peut envisager seulement le rendement de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique utile à l'énergie mécanique transformée soit :

$$\frac{895}{960} = 0{,}932 \quad \text{ou} \quad 93{,}2\ \%.$$

C'est le ***rendement électrique*** de la dynamo. L'énergie transformée étant EIt et l'énergie électrique utile UIt, le rendement électrique η (*êta*) vaut :

$$\eta = \frac{UIt}{EIt} = \frac{U}{E}.$$

Résumé.

1. — **Un générateur a une force électromotrice E et une résistance intérieure r.**

2. — **La force électromotrice a même valeur que la tension aux bornes à circuit ouvert.**

3. — **En charge la tension aux bornes U diminue lorsque l'intensité I du courant débité augmente. La résistance intérieure du générateur est la cause de cette chute interne de tension. La loi d'Ohm appliquée à un générateur s'écrit :**

$$U = E - rI$$

volts volts ohms ampères

4. — **Quand un générateur de f. é. m. E et de résistance intérieure r débite dans une résistance R, l'intensité du courant dans le circuit est :** $I = \frac{E}{R + r}$.

5. — **La force électromotrice d'un générateur mesure l'énergie cédée à chaque coulomb qui le traverse :**

$$E = W/Q.$$

Le rendement électrique d'un générateur est égal au rapport de la tension aux bornes U à la f. é. m. E :

$$\eta = U/E.$$

Exercices.

1. Un élément Leclanché de f. é. m. 1,5 *V* débite 0,25 *A* dans une résistance de 5 Ω branchée à ses bornes.

Quelle est sa résistance intérieure?

Quelle est la tension entre ses bornes quand il débite dans la résistance de 5 Ω?

Quelle puissance totale fournit-il? Quelle est la puissance dissipée en chaleur dans la résistance extérieure?

2. Un voltmètre branché aux bornes d'un générateur indique 1,5 *V* quand le circuit est ouvert et 1,2 *V* quand la pile débite 0,3 *A*. Quelle est la résistance intérieure du générateur et la résistance extérieure dans laquelle il débite?

3. Un élément Leclanché a une f. é. m. de 1,5 *V* et une résistance intérieure de 0,5 Ω. Calculer l'intensité débitée, la tension aux bornes de l'élément, la puissance qu'il fournit dans une résistance extérieure dont les valeurs successives sont 1 Ω, 2 Ω, 2,5 Ω, 3,5 Ω, 9,5 Ω.

Construire la courbe de la puissance débitée en fonction de la résistance extérieure en représentant 1 Ω par 1 *cm* et 1 watt par 10 *cm*.

4. Une dynamo, dont la f. é. m. est 230 *V*, débite un courant de 16 *A*; sa résistance intérieure est 1,2 Ω. Quelle est la tension aux bornes de la machine? Quelle puissance fournit-elle?

5. Un moteur à explosion entraîne une dynamo. Le rendement de ce moteur est 0,25 et il consomme par heure 12 *litres* d'essence de masse spécifique 0,75 kg/dm^3 et de pouvoir calorifique 11 000 *kilocalories* par kilogramme.

a) Quelle puissance mécanique le moteur fournit-il à la dynamo?

b) 6 % de cette puissance sont transformés en chaleur par frottement; quelle est la puissance transformée en énergie électrique.

c) la dynamo débite un courant de 120 ampères sous une tension de 213 volts, calculer sa force électromotrice et sa résistance intérieure.

6. On relève la tension aux bornes d'un accumulateur en fonction de l'intensité du courant qu'il débite. Voici les résultats de ces mesures :

U	5,76	5,51	5,25	5 *volts*
I	5	10	15	20 *ampères*

Tracer la courbe représentant la tension U en fonction de l'intensité I. Interpréter cette courbe, en déduire les valeurs de la f. é. m. et de la résistance interne de l'accumulateur.

Principe des piles électriques

I. Piles hydro-électriques

1. Réalisons une pile hydro-électrique.

Expériences. — a) Deux lames de cuivre plongent dans une solution au 1/10e d'acide sulfurique.

Relions-les aux bornes d'un voltmètre polarisé (fig. 1). L'aiguille de celui-ci ne dévie pas.

Il en est de même avec deux lames de zinc, deux lames de charbon ou, plus généralement, avec deux lames conductrices de même nature.

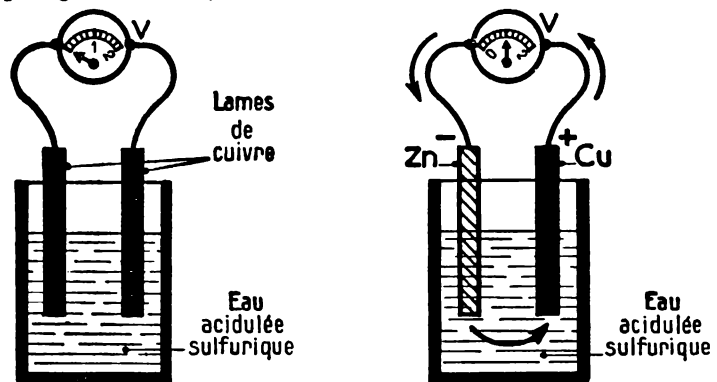


Fig. 1. — Les deux électrodes sont de même nature. Le voltmètre ne dévie pas.

Fig. 2. — Le voltmètre dévie. La f. é. m. de la pile Volta est de 1 *volt*.

b) Recommençons l'expérience avec une lame de *cuivre* et une lame de *zinc*. Le voltmètre dévie et indique une tension d'environ 1 *volt* (fig. 2).

Nous avons réalisé une ***pile hydro-électrique*** que l'on nomme ***pile de Volta.***

Le pôle positif de cette pile est la lame de cuivre, son pôle négatif la lame de zinc. La f. é. m. est d'environ 1 *volt.*

Une pile hydro-électrique est un générateur chimique d'électricité constitué par deux électrodes conductrices de natures différentes plongeant dans un électrolyte.

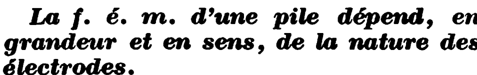
2. Cherchons comment varie la f. é. m. d'une pile.

Expériences. — Reprenons la pile Volta. En écartant plus ou moins les lames, ou *électrodes*, en les sortant plus ou moins du liquide nous constatons que l'indication du voltmètre ne varie pas (fig. 3).

La f. é. m. d'une pile hydro-électrique ne dépend pas de ses dimensions.

Remplaçons l'électrode de cuivre par une lame de *charbon*, le voltmètre indique 1,3 *volt*. Le charbon est le pôle positif.

Au contraire après avoir remis en place l'électrode de cuivre, remplaçons la lame de zinc par une lame de charbon. Le voltmètre indique 0,2 *volt*. Le cuivre est le pôle positif.



La f. é. m. d'une pile dépend, en grandeur et en sens, de la nature des électrodes.

Fig. 3. — La f. é. m. d'une pile ne change pas lorsqu'on modifie l'écartement des électrodes ou leur surface immergée.

Avec pour électrodes une lame de cuivre et une lame de zinc, utilisons comme électrolyte une solution de potasse au 1/10e. Le voltmètre indique une f. é. m. de 0,7 *volt* au lieu de 1 *volt* avec l'acide sulfurique.

La f. é. m. d'une pile dépend de la nature de l'électrolyte.

3. Observons l'élément de Volta quand il débite dans une résistance extérieure.

Expérience. — Branchons aux bornes de l'élément une résistance d'environ 1 ohm avec un ampèremètre en série (fig. 4).

Un courant passe dans le circuit extérieur, en allant du cuivre au zinc.

Nous constatons un dégagement de bulles gazeuses à la *surface du cuivre.*

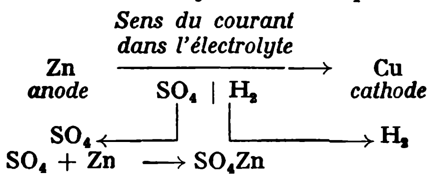
La lame de *zinc* se dissout. Si au bout de quelques minutes de fonctionnement, nous prélevons un peu du liquide et y ajoutons *lentement* quelques gouttes d'une solution de potasse, il se produit un précipité blanc qui montre la présence du sulfate de zinc (SO_4Zn).

Interprétation de ces faits. — Nous savons que le zinc attaqué par l'acide sulfurique dégage de l'hydrogène.

$$Zn + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4Zn + H_2.$$

Puisque, dans l'élément Volta, l'hydrogène se dégage à la surface du cuivre et non sur le zinc, c'est que le phénomène n'est pas une simple attaque chimique mais une électrolyse.

Le courant va du zinc au cuivre à l'intérieur du liquide; le zinc est anode, le cuivre, cathode. L'électrolyse se résume par le schéma suivant :



Par la formation du sulfate de zinc, de l'énergie chimique se transforme en énergie électrique. La pile consomme du zinc et de l'acide et fournit de l'énergie électrique.

4. L'élément de Volta se polarise très vite.

Expérience. — Faisons débiter la pile dans la résistance pendant plusieurs minutes (fig. 4).

L'intensité du courant fourni baisse rapidement.

La f. é. m., qui était voisine de 1 volt au début, descend à 0,6 volt, 0,4 volt, etc.

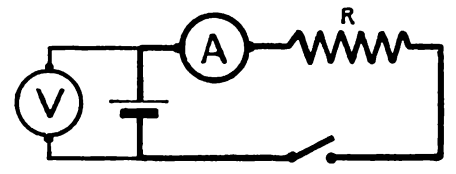


Fig. 4. — Une pile Volta qui débite dans une résistance se polarise vite si la résistance est faible.

On dit que ***l'élément s'est polarisé.***

En laissant l'élément au repos, c'est-à-dire à circuit ouvert, la f. é. m. remonte peu à peu; il y a *dépolarisation spontanée,* mais il faut des heures pour que cette dépolarisation soit complète.

Quelle est la cause de la polarisation? C'est la formation, à la surface du cuivre, d'une couche de bulles d'hydrogène extrêmement fines qui restent accrochées au métal au lieu de se dégager.

Cette explication se justifie par les expériences suivantes :

1° Sortons la lame de cuivre du liquide; essuyons-la pour enlever les bulles adhérentes : la pile est dépolarisée.

2° Ajoutons à l'eau acidulée un oxydant, de l'eau oxygénée (H_2O_2), qui brûle l'hydrogène lors de sa formation : l'intensité débitée augmente aussitôt.

3o Employons comme pôle positif une plaque de cuivre que nous avons recouverte d'oxyde noir de cuivre (CuO), en la chauffant au rouge dans la flamme oxydante d'un bec Bunsen. La polarisation est ralentie : l'oxyde de cuivre est peu à peu réduit par l'hydrogène.

5. La pile de Volta n'est pas utilisable.

Malgré sa simplicité, la pile de Volta n'est plus employée parce qu'elle se polarise trop vite.

Nous l'avons étudiée parce que les phénomènes y sont très simples.

Pour qu'une pile soit pratique, il faut que sa dépolarisation se produise commodément au cours de son fonctionnement. On emploie pour cela une substance oxydante placée autour du pôle positif le *dépolarisant.*

II. Piles ou couples thermo-électriques

1. Réalisons une pile thermo-électrique.

Expériences. — Prenons un fil de fer et deux fils de cuivre d'environ 1 *mm* de diamètre et 1 *m* de longueur. Tordons les extrémités du fil de *fer* avec chaque fil de *cuivre* de façon à réaliser un bon contact. Relions les extrémités libres des fils de cuivre aux deux bornes d'un ampèremètre très sensible, un microampèremètre (fig 5).

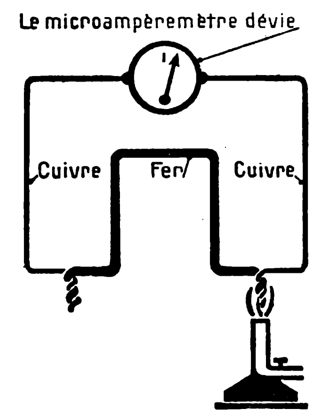


Fig. 5. — Lorsqu'on chauffe le contact de deux métaux différents, il y a naissance d'une f. é. m. thermo-électrique.

Chauffons l'un des contacts avec un bec Bunsen, l'aiguille du microampèremètre dévie.

L'élévation de température d'un des contacts a créée une f. é. m., cette f. é. m. produit un courant dans le circuit. C'est ce courant que le microampèremètre met en évidence.

L'appareil est une pile ou un ***couple thermo-électrique.***

Si l'ensemble du circuit est formé soit de fils de cuivre, soit de fils de fer, le microampèremètre ne dévie pas (fig. 6). Il en est de même si tout le circuit est à la même température ou si l'on chauffe un fil loin des contacts. Donc :

Une pile ou un couple thermo-électrique est un générateur constitué par deux contacts de métaux de natures différentes portés à des températures différentes.

L'un des contacts est **la** *soudure chaude*, l'autre la ***soudure froide;*** en effet dans les couples industriels, pour que le contact soit meilleur, les métaux sont soudés.

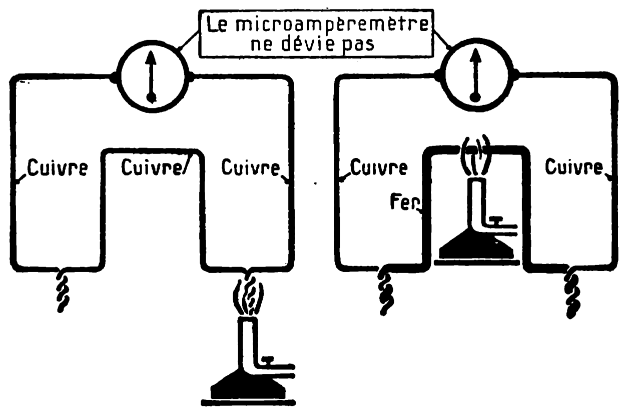


Fig. 6. — Lorsqu'on chauffe le contact de deux métaux identiques, ou lorsque les contacts de deux métaux différents sont à la même température, le microampèremètre ne dévie pas.

2. Comment varie la f. é. m. d'un couple thermoélectrique.

Expériences. — Reprenons le couple cuivre-fer et chauffons plus fortement la soudure chaude, la déviation du microampèremètre augmente lorsque la température de la soudure croît.

La soudure froide était à la température ambiante; plongeons-la dans un verre contenant de la glace fondante, la déviation du microampèremètre croît encore lorsque **la** température de la soudure froide diminue.

Pour un couple donné, la f. é. m. qu'il produit dépend de la différence des températures entre la soudure froide et la soudure chaude.

Par exemple, le *couple cuivre-fer* produit **une f. é. m.** de 1,1 *millivolt* pour une différence de température de 100°.

Remplaçons le fil de fer du couple précédent par un fil de *constantan* (alliage cuivre-manganèse), nous obtenons un *couple cuivre-constantan.* Pour une même différence de température entre les soudures, le microampèremètre dévie plus qu'avec le couple cuivre-fer. La f. é. m. produite est donc plus grande; par exemple, lorsque la soudure froide est dans la glace fondante et la soudure chaude dans l'eau bouillante **la f. é.** m. produite est de 4 *millivolts.*

3. Les couples thermo-électriques sont utilisés pour repérer les températures élevées.

Les couples thermo-électriques ne sont pratiquement jamais utilisés comme générateurs d'énergie électrique; on les emploie pour repérer les températures élevées. On utilise alors :

le couple *cuivre-constantan* jusqu'à 400 °C,
le couple *chromel-alumel*[1] jusqu'à 1 200 °C,
le couple *platine-platine rhodié* (alliage de platine et d'un métal rare, le *rhodhium*) jusqu'à 1 500 °C.

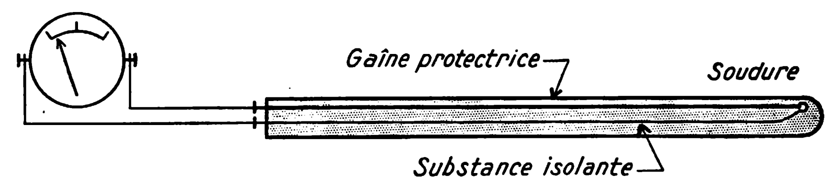


Fig. 7. — **Pyromètre industriel.** Le couple thermoélectrique est isolé à l'intérieur d'une gaine protectrice; l'ensemble forme une canne pyrométrique.

Le microampèremètre est gradué directement en température. Lorsqu'une grande précision n'est pas requise, on laisse la soudure froide à la température ambiante, c'est la solution adoptée dans les pyromètres industriels (fig. 7).

Résumé.

1. — Une pile hydro-électrique est un générateur constitué par deux électrodes conductrices de natures différentes, plongeant dans un électrolyte.

2. — La force électromotrice d'un élément de pile hydro-électrique dépend seulement de la nature des électrodes et de l'électrolyte.

3. — L'énergie électrique fournie par la pile provient de l'attaque du zinc par l'électrolyte.

4. — Une pile en fonctionnement se polarise très vite; une couche d'hydrogène se forme sur l'électrode positive.

5. — Les piles ou couples thermo-électriques sont constitués par deux contacts de métaux différents portés à des températures différentes.

6. — La force électromotrice d'un couple thermo-électrique dépend de la nature des métaux et de la différence de température entre les contacts.

Ces couples sont utilisés pour la mesure des températures élevées.

1. **Chromel** : alliage 90 % de *nickel* et 10 % de *chrome*.
Alumel : alliage 97 % de *nickel* et 3 % d'*aluminium*.

LECTURE

La pile de Volta.

Au commencement de l'année 1800, *à la suite de quelques vues théoriques, l'illustre professeur imagina de former une longue colonne en superposant successivement une rondelle de cuivre, une rondelle de zinc et une rondelle de drap mouillé, avec la scrupuleuse attention de ne jamais intervertir cet ordre. Qu'attendre à priori d'une telle combinaison? Eh bien! je n'hésite pas à le dire, cette masse, en apparence inerte, cet assemblage bizarre, cette pile de tant de métaux dissemblables séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé, sans excepter le télescope et la machine à vapeur.*

Arago. *Eloge de Volta* (1833).

Exercices.

1. Vous avez appris dans le cours de chimie :

a) qu'une lame de zinc plongée dans une solution d'un sel de cuivre se couvre de cuivre;

b) qu'une lame de zinc pur plongée dans une solution d'acide sulfurique pur n'est pas attaquée;

c) que si on ajoute quelques gouttes d'un sel de cuivre l'attaque se produit avec dégagement d'hydrogène.

Expliquez cette attaque en vous rappelant la pile de Volta.

2. Le zinc du commerce renferme diverses impuretés et surtout un peu de plomb. Plongé dans une solution d'acide sulfurique, il est attaqué.

Expliquez ce fait en utilisant ce que vous savez de la pile de Volta.

3. Dans une pile ayant pour électrodes une lame de fer et une d'étain, l'étain est le pôle positif. Au contraire dans une pile fer-zinc, c'est le fer qui est positif.

A l'aide de ces données, expliquer pourquoi le fer blanc (fer recouvert d'étain) se rouille très vite lorsque la couche d'étain est détruite en quelques points.

Le fer galvanisé (fer recouvert de zinc) se rouille difficilement. Pourquoi?

Les piles usuelles

I. Caractéristiques des piles hydro-électriques

1. Un élément de pile est caractérisé par sa force électromotrice et sa résistance intérieure.

Expériences. — Montons un voltmètre aux bornes d'un élément de pile Leclanché. Il indique 1,5 V, c'est la f. é. m. de l'élément : E = 1,5 *volt.*

Nous savons déjà (23e leçon) que cette f. é. m. ne dépend que de la constitution de l'élément, c'est-à-dire de la nature des électrodes, de la composition et de la concentration de l'électrolyte. Elle varie un peu avec la température.

Faisons débiter l'élément Leclanché dans une résistance de 3Ω par exemple (fig. 1). La tension aux bornes devient U = 0,9 V et

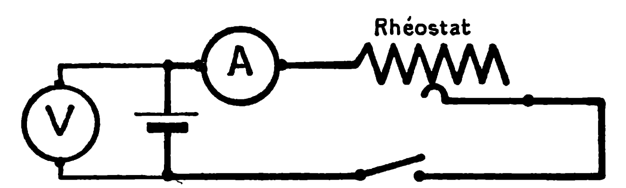


Fig. 1. — Lorsqu'on ferme l'interrupteur l'élément de pile débite sur le rhéostat. La lecture du voltmètre diminue.

l'intensité du courant débité est I = 0,3 A. La résistance intérieure r de cet élément est donc :

$$U = E - rI \qquad rI = E - U$$

$$r = \frac{E - U}{I} = \frac{1,5 - 0,9}{0,3} = \frac{0,6}{0,3} = 2\Omega$$

Soulevons le bâton de zinc : l'intensité indiqué par l'ampèremètre diminue; elle est presque réduite de moitié quand un tiers seulement du bâton de zinc plonge dans l'électrolyte. Nous constatons les mêmes effets en soulevant le vase poreux.

La résistance intérieure n'est pas la même pour toutes les piles d'un même type. C'est la résistance de l'électrolyte compris entre les deux

électrodes; elle dépend donc de la surface des électrodes en contact avec l'électrolyte, de leur distance, de la concentration de l'électrolyte, etc.

On peut mesurer cette résistance en réunissant les bornes de l'élément par des fils courts. L'élément débite en court-circuit (fig. 2). La résistance extérieure étant alors négligeable, la résistance totale du circuit est celle de l'élément *r*. L'ampèremètre indique un *courant de court-circuit* $I_e = 0{,}75$ A, d'où : $r = \frac{E}{I_e} = \frac{1{,}5}{0{,}75} = 2\Omega$.

Fig. 2. — Estimation de la résistance intérieure d'un élément de pile. L'élément est *court-circuité* par un ampèremètre.

2. L'intensité maximum débitée et la capacité sont des renseignements d'importance pratique.

Pour qu'une pile soit utilisable il faut que la *dépolarisation* s'effectue commodément. La *polarisation* est d'autant plus rapide que l'intensité du courant débité par la pile est plus grande; on conçoit que chaque type de pile a un ***débit maximum*** en *régime permanent.* On peut cependant, pendant un temps très court, faire débiter à une pile une intensité supérieure à son débit maximum. La dépolarisation s'effectue alors pendant les périodes de repos.

Une pile Leclanché consomme, en fonctionnant, du zinc et du chlorure d'ammonium. Sa ***capacité*** s'exprime par la *quantité d'électricité qu'elle peut fournir* jusqu'à usure du zinc ou du chlorure d'ammonium. Cette capacité est plus grande pour un gros élément que pour un petit. Elle est de l'ordre de 30 à 90 *ampères-heures* pour un élément Leclanché à vase poreux suivant sa taille.

II. Piles usuelles

Les piles ont été très employées. Pendant la première moitié du XIXe siècle, elles ont été les seuls générateurs connus de courant continu. Un grand nombre de modèles ont été inventés. Quelques-uns seulement sont encore utilisés.

3. La pile Leclanché est celle dont l'usage est le plus fréquent.

Nous en avons décrit un modèle dans la 22e leçon. Rappelons qu'elle comprend :

Electrolyte : solution à 20 % de chlorure d'ammonium.
Electrode positive : plaque de charbon de cornue.
Electrode négative : bâton de zinc amalgamé.
Dépolarisant : bioxyde de manganèse.

La théorie de la pile peut se résumer ainsi :

$$- \text{Zn} \xrightarrow[\textit{dans l'électrolyte}]{\textit{sens du courant}} \text{C} +$$

$$\text{Cl} \mid \text{NH}_4$$

$$\text{Cl} \longleftarrow \quad \longrightarrow \text{NH}_4$$

$$2\text{Cl} + \text{Zn} \longrightarrow \text{Cl}_2\text{Zn} \qquad \text{NH}_4 \longrightarrow \text{NH}_3 + 1/2\,\text{H}_2$$

$$2\text{MnO}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Mn}_2\text{O}_3$$

d'où la réaction globale :

$$\text{Zn} + 2\text{NH}_4\text{Cl} + 2\,\text{MnO}_2 \longrightarrow \text{Cl}_2\text{Zn} + 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{Mn}_2\text{O}_3.$$

Le bioxyde de manganèse, dans les conditions où il est employé, est un oxydant peu énergique et la dépolarisation est lente.

D'autre part, le liquide s'enrichit peu à peu en chlorure de zinc et en ammoniaque. Sous l'influence de l'oxygène de l'air qui se dissout un peu dans le liquide, il se forme, à la longue, de l'oxychlorure de zinc, corps blanc, insoluble, peu conducteur, qui recouvre le zinc et bouche les pores du vase poreux.

L'élément Leclanché, décrit ci-dessus, a l'avantage de fournir une f. é. m. élevée, (1,5 V), et d'être constitué par des corps qui ne sont pas dangereux à manier.

Mais sa dépolarisation est lente; aussi n'est-il propre qu'à un service intermittent. A cause du vase poreux, sa résistance intérieure est grande. De plus, par évaporation du liquide, il se forme des sels grimpants qui détériorent les bornes et les conducteurs. On gêne leur formation en paraffinant toutes les parties de l'élément qui dépassent le niveau du liquide : verre, charbon, zinc, bornes.

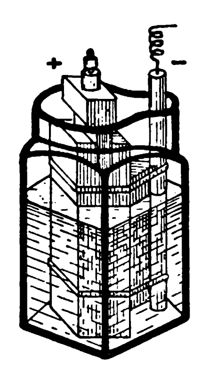


Fig. 3. — Pile Leclanché à agglomérés.

5. L'élément Leclanché a été perfectionné.

On a cherché à réduire sa résistance intérieure, à le rendre transportable et à améliorer sa conservation.

a) Pour ***diminuer la résistance intérieure***, on a supprimé le vase poreux.

1° ***Pile à agglomérés.*** Deux briquettes d'un mélange de bioxyde de manganèse et de graphite sont appliqués sur les deux faces de la lame de charbon positive. La résistance intérieure n'est plus que 0,5 Ω environ (fig. 3).

2° ***Pile à sac.*** Le vase poreux est remplacé par un sac de toile; le dépolarisant est un mélange de bioxyde de manganèse et de graphite humecté par une solution de chlorure d'ammonium. Le pôle négatif est une feuille de zinc qui entoure le sac. La résistance intérieure est de l'ordre de 0,1 Ω.

b) Pour ***immobiliser le liquide***, on y mélange de la fécule ou de l'amidon; il se forme une gelée On obtient ainsi une ***pile sèche*** ou plutôt humide.

Les piles sèches sont du type à sac. Le zinc sert de récipient pour contenir le liquide immobilisé et le charbon entouré de dépolarisant (fig. 4). Il s'amalgame automatiquement par suite de l'addition de bichlorure de mercure à l'électrolyte.

c) Pour améliorer les conditions de conservation des piles sèches on imperméabilise les boitiers et on ajoute à l'électrolyte des substances qui ralentissent le séchage de la pâte.

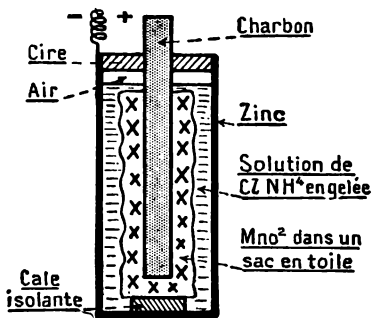


Fig. 4. — **Élément de pile sèche.** Une pile de lampe de poche comporte 3 éléments en série.

6. La pile Féry utilise l'oxygène de l'air comme dépolarisant.

Le bioxyde de manganèse est un produit coûteux; dans les piles à dépolarisation par l'air, comme la pile Féry, il est supprimé. Le pôle positif de cette pile est un charbon très poreux qui absorbe l'air. Son pôle négatif est une plaque de zinc amalgamé. L'électrolyte peut être du chlorure d'ammonium ou une solution de soude (fig. 5).

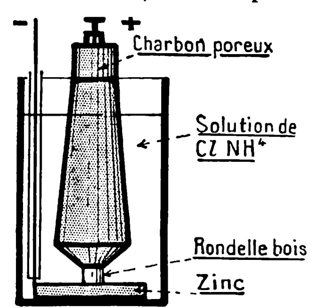


Fig. 5. — **Élément Féry.** C'est l'air qui sert de dépolarisant.

L'hydrogène, formé pendant la polarisation, est oxydé par l'oxygène de l'air qui pénètre dans le charbon poreux. L'air joue le rôle de dépolarisant.

La f. é. m. d'un élément Féry est d'environ 1,25 V.

7. Piles impolarisables.

Ces piles ne donnent pas de dégagement d'hydrogène sur l'électrode positive. On les emploie surtout comme étalons de force électromotrice.

Lorsqu'on ne cherche pas une grande précision on peut utiliser une ***pile Daniell*** dont la f. é. m. est 1,08 volt à 20°C. Cette pile utilise deux liquides. Elle comprend (fig. 6) :

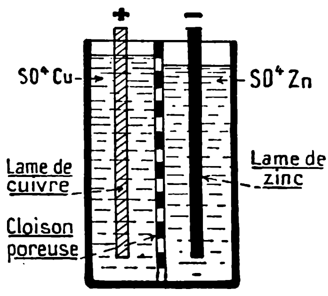


Fig. 6. — **Elément Daniell** (figure schématique). Le sulfate de cuivre et le sulfate de zinc sont en solution dans l'eau.

Électrode négative : zinc plongeant dans une solution de sulfate de zinc.

Électrode positive : cuivre plongeant dans une solution de sulfate de cuivre.

Dans les mesures de précision on emploie comme étalon de f. é. m., l'***élément Weston.*** Il est constitué ainsi (fig. 7) :

Électrode positive : mercure et sulfate mercureux.

Électrolyte : solution saturée de sulfate de cadmium.

Électrode négative : amalgame de cadmium.

Sa f. é. m. est 1,018 6 volt à 20°C.

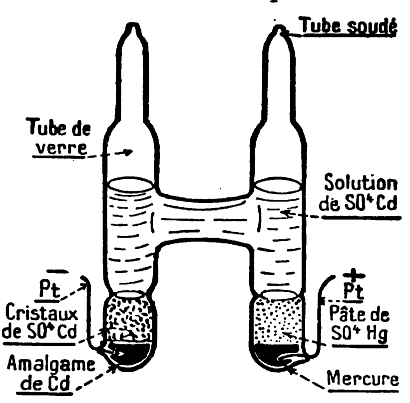


Fig. 7. — **Élément Weston.** La forme en H évite le mélange des constituants pendant les transports.

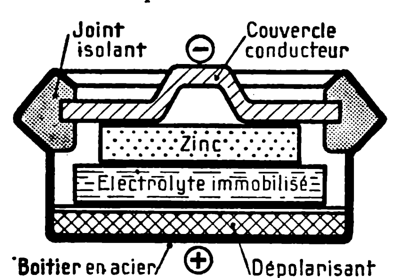


Fig. 8. — **Élément Ruben.** Le *pôle positif* est le boitier en acier, le *pôle négatif* est en poudre de zinc comprimée. L'*électrolyte* est une solution de potasse contenant du zincate de potassium. Le *dépolarisant* est formé d'oxyde de mercure. La f. é. m. moyenne de l'élément est 1,3 *volt.*

8. Derniers perfectionnements.

Les piles étaient surtout utilisées jusqu'à ces dernières années pour faire fonctionner les sonneries ou téléphones d'appartement et les lampes portatives. On utilisait presque uniquement les piles Leclanché ou Féry.

Les besoins de l'industrie électronique, pour l'alimentation du matériel portatif, ont donné une nouvelle impulsion aux recherches concernant les piles. On a cherché à les rendre plus légères en remplaçant le zinc par du ***magnésium.*** Malheureusement le magnésium est, en général, attaqué par l'électrolyte et ces piles se conservent mal. On peut malgré tout les utiliser en les remplissant au moment de l'emploi. C'est ainsi qu'on réalise, pour équiper les radeaux de sauvetage, une pile au magnésium utilisant comme électrolyte l'eau de mer.

On a cherché aussi à obtenir une f. é. m. plus constante pendant la décharge. L'un des modèles les plus perfectionnés est la ***pile Ruben*** (fig. 8) qui équipe les appareils portatifs, émetteurs ou récepteurs de radio, de l'armée américaine.

Résumé.

1. — Un élément de pile est caractérisé par sa force électromotrice et sa résistance intérieure.

2. — La capacité d'un élément de pile est égale à la quantité d'électricité, exprimée en ampères-heures, qu'il peut fournir jusqu'à usure complète.

3. — La pile Leclanché est la plus utilisée. Elle a été modifiée soit pour diminuer sa résistance interne (pile à sac), soit pour la rendre transportable (pile sèche).

4. — Dans la pile Féry, l'oxygène de l'air sert de dépolarisant.

5. — Les éléments Daniell et Weston sont des étalons de force électromotrice.

Exercices.

1. L'acide nitrique NO_3H est un oxydant fort énergique, mais il attaque le zinc et aussi le cuivre. Imaginer un élément de pile où le dépolarisant sera de l'acide nitrique.

2. Un élément Leclanché à vase poreux dont la f. é. m. est 1,5 *V* a une résistance intérieure de 2,8 Ω. Un élément à sac a même f. é. m., mais une résistance intérieure de 0,1 Ω.

Quelle est l'intensité débitée dans une résistance extérieure de 0,2 Ω par l'un et par l'autre de ces éléments?

3. Le zinc d'une pile Féry pèse 120 *g*. Quelle est la capacité de l'élément :

1° en coulombs;

2° en ampères-heures,

sachant qu'une valence-gramme de zinc qui pèse 65 : 2 = 32,5 *g* produit 96 500 coulombs?

4. La réaction de fonctionnement d'un élément Leclanché est :

$$Zn + 2\,NH_4Cl + 2\,MnO_2 \longrightarrow Cl_2Zn + 2\,NH_3 + H_2O + Mn_2.O_3.$$

Quelle est la consommation théorique par ampère-heure de Zn, d'NH_4Cl et de MnO_2?

Zn = 65, N = 14, Cl = 35,5, Mn = 55, O = 16.

Association des éléments de piles.

En groupant de manière convenable un nombre suffisant d'éléments de piles, on obtient soit une tension élevée, soit une grande intensité.

1. Groupement en série (ou en tension).

Soit n éléments de piles. Chacun d'eux a une f. é. m. e et une résistance intérieure r. Réunissons par un fil métallique le pôle négatif du premier élément au pôle positif du second, le pôle négatif du second au pôle positif du troisième et ainsi de suite. Par ce mode de couplage en série, nous formons une pile qui fournira un courant d'intensité I dans une résistance extérieure R (fig. 1).

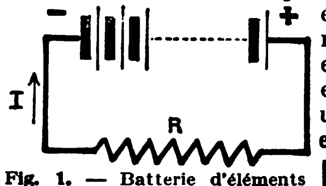


Fig. 1. — Batterie d'éléments en série.

a) Nous constatons avec un voltmètre que la f. é. m. de 2 éléments en série est $2e$, de 3 éléments, $3e$,.... de n éléments ne.

b) Le courant I fourni par la pile traverse successivement tous les éléments; donc les résistances intérieures de ces éléments s'ajoutent et la résistance intérieure de la batterie est nr.

c) L'intensité du courant dans le circuit extérieur est par conséquent

$$I_s = \frac{ne}{R + nr}. \qquad (1)$$

Exemple. — En groupant en série trois petits éléments Leclanché à liquide immobilisé de f. é. m. 1,5 V et de résistance intérieure 0,3 Ω, on obtient une pile de lampe de poche dont la f. é. m. est 1,5 × 3 = 4,5 V et la résistance intérieure 0,3 × 3 = 0,9 Ω.

Cette pile, dans une résistance extérieure de 8,1 Ω, produit un courant de

$$\frac{4,5}{0,9 + 8,1} = 0,5 \text{ ampère.}$$

Remarques. — 1. L'intensité la plus grande que peut produire 1 élément de pile s'obtient en court-circuitant ses deux pôles, c'est $e : r$.

De même, l'intensité maximum que peut fournir une batterie de n éléments en série, sa f. é. m. étant ne et sa résistance intérieure nr, est :

$$\frac{ne}{nr} = \frac{e}{r},$$

Donc, en couplant des éléments en série, on *augmente la tension*, mais on ne change pas la limite maximum de l'intensité du courant débité.

2. Rien n'empêche d'associer en série des éléments de piles ou d'accumulateurs de modèles différents : les f. é. m. et les résistances intérieures s'ajoutent.

2. Groupement en parallèle (ou en quantité, ou en dérivation).

Tous les pôles positifs sont réunis par un fil métallique qui constitue le pôle positif de la batterie. De même, tous les pôles négatifs sont reliés par un fil métallique qui forme le pôle négatif (fig. 2).

Tous les éléments groupés doivent avoir la même f. é. m. e pour que des courants de circulation ne se produisent pas entre eux. Supposons, en outre, qu'ils aient la même résistance intérieure r.

1. La f. é. m. de la batterie est celle d'un élément, soit e. Nous pouvons le vérifier avec un voltmètre.

2. Si l'on relie la batterie à une résistance extérieure R, il se produit un courant I_d dans la résistance. Toutes les résistances intérieures sont en parallèle et la résistance équivalente est $r : n$.

L'intensité du courant débité par la pile est donc :

$$I_d = \frac{e}{R + \frac{r}{n}}. \qquad (2)$$

Fig. 2. — Batterie de piles en parallèle.

Puisque tous les éléments sont identiques, chacun d'eux est traversé par une intensité $I : n$.

Remarque. — L'intensité la plus grande que fournit 1 élément de la pile quand on court-circuite les deux pôles de l'élément est $e : r$.

L'intensité la plus grande que fournit la pile de n éléments en dérivation est

$$\frac{e}{\frac{r}{n}} = \frac{ne}{r}.$$

Le couplage en dérivation n'a pas modifié la f. é. m.; mais il a *augmenté la limite maximum de l'intensité* du courant débité.

3. Quel mode de couplage faut-il choisir pour obtenir dans une résistance extérieure R l'intensité la plus grande possible?

Avec le couplage en série, l'intensité obtenue est, suivant la formule (1) :

$$I_s = \frac{ne}{R + nr}.$$

Avec le couplage en dérivation, suivant la formule (2) :

$$I_d = \frac{e}{R + \frac{r}{n}} = \frac{ne}{nR + r}.$$

On aura $I_s > I_d$, soit $\frac{ne}{R + nr} > \frac{ne}{nR + r}$

si $R + nr < nR + r$ ou $(n - 1)r < (n - 1)R$, soit $r < R$

D'où la règle :

Quand la résistance extérieure est *supérieure* à la résistance intérieure d'*un* élément, *coupler en série;*

Quand la résistance extérieure est *inférieure* à la résistance intérieure d'*un* élément, coupler en *dérivation*.

4. On utilise parfois un groupement mixte.

On monte plusieurs séries identiques d'éléments et on associe ces séries en parallèle (fig. 3).

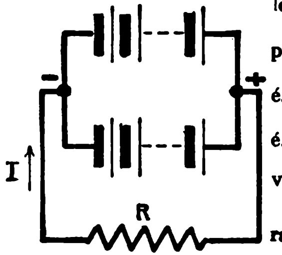


Fig. 3. — Batterie de piles en séries-parallèles.

Soit $n = p \times q$ le nombre d'éléments dont on dispose.

Soit p le nombre d'éléments dans chaque série : la f. é. m. d'une série est pe, la résistance intérieure pr.

Soit q le nombre de séries couplées en parallèle : la f. é. m. de l'ensemble reste pe, la résistance intérieure devient $\frac{pr}{q}$.

Dans une résistance extérieure R, l'intensité du courant débité est donc :

$$I = \frac{pe}{R + \frac{pr}{q}} = \frac{ne}{qR + pr} \qquad (3)$$

Proposons-nous le problème suivant qui n'a d'ailleurs aucun intérêt pratique *Comment coupler* n *éléments de piles de f. é. m.* e *et de résistance intérieure* r *pour en tirer, dans une résistance extérieure R, le courant maximum?*

I de la formule (3) est maximum, puisque ne est constant, quand le dénominateur $qR + pr$ est minimum. Or le produit des deux termes qR et pr est constant puisque :

$$qR \times pr = nRr \qquad (4)$$

La somme des deux termes est minimum quand les deux termes seront égaux :

$$qR = pr$$

Si cette condition est réalisée, (4) devient

$$(pr)^2 = nRr \qquad \text{ou} \qquad p^2 = n\frac{R}{r}.$$

p est un nombre entier diviseur de n, c'est donc le diviseur de n le plus voisin de la racine carrée de $n\frac{R}{r}$.

5. Emploi de ces modes de couplage.

En principe, tous les générateurs de courant continu : éléments d'accumulateurs, dynamos, peuvent s'associer comme les éléments de piles.

En pratique, les éléments de piles, les éléments d'accumulateurs ne se couplent guère qu'en série.

Les dynamos se montent parfois en série, mais plus souvent en dérivation.

Résumé.

Les générateurs de courant continu peuvent être groupés :

en série : $I = \dfrac{ne}{R + nr}$

en parallèle : $I = \dfrac{ne}{nR + r}$

en séries parallèles : $I = \dfrac{ne}{qR + pr}$.

Exercices.

1. Un apprenti électricien raisonne ainsi :

« Un élément Leclanché, de f. é. m. 1,5 V et de résistance intérieure 0.5 Ω débite 1 A dans une résistance extérieure de 1 Ω, un second élément identique branché aux bornes de la même résistance donnera aussi 1 A,

un troisième débitera de même 1 ampère, etc.

Donc on obtiendra 10 A dans la résistance extérieure de 1 Ω en utilisant 10 éléments débitant à la fois, c'est-à-dire 10 éléments couplés en parallèle. »

Ce raisonnement est faux. Pourquoi ?

2. On dispose de 10 éléments Leclanché dont la f. é. m. est 1,5 V et la résistance intérieure 2,5 Ω.

1° Quelle est l'intensité du courant fourni par l'un de ces éléments dans une résistance extérieure de 0,5 Ω?

2° Quelle est l'intensité fournie dans la même résistance par les 10 éléments couplés en série?

3° Quelle est l'intensité fournie dans la même résistance par les 10 éléments couplés en dérivation?

4° Mêmes questions dans le cas où la résistance extérieure est 20 Ω.

3. La capacité d'un élément de pile est Q Ah. Quelle est la capacité d'une pile formée de :

1° n éléments en série?

2° n éléments en parallèle?

4. Une pile de 12 éléments couplés en série débite dans un circuit extérieur dont la résistance est 10 ohms un courant de 2 ampères. La résistance intérieure de la pile est 0,85 ohm.

On demande

1° la f. é. m. de la pile;

2° la f. é. m. d'un élément (les éléments sont identiques);

3° la résistance intérieure d'un élément.

6. ACCUMULATEURS

26e LEÇON

Propriétés des récepteurs. Force contre-électromotrice.

Nous avons étudié les récepteurs dans lesquels l'énergie électrique se transforme en énergie calorifique. Nous nous proposons, dans cette leçon, d'étudier les récepteurs dans lesquels l'énergie électrique se transforme principalement en *énergie chimique ou mécanique*, c'est-à-dire les cuves à électrolyse et les moteurs.

Lames de cuivre
Solution sulfate de cuivre

Fig. 1. — Étude de la tension U aux bornes d'une cuve à électrolyse en fonction de l'intensité I du courant qui la traverse.

1. Expérience avec une cuve à électrolyse cuivre-sulfate de cuivre.

Une cuve à électrolyse contient une solution de sulfate de cuivre à 10 %. Les électrodes sont deux plaques de cuivre. Effectuons le montage de la figure 1. Le rhéostat permet de régler l'intensité I du courant. Un voltmètre mesure la tension U aux bornes de la cuve. Notons cette tension pour diverses valeurs de l'intensté du courant :

I	0,5	1	1,5	2	*ampères*
U	3	6	9	12	*volts*

La tension aux bornes de la cuve est proportionnelle à l'intensité du courant; ***la cuve cuivre-sulfate de cuivre-cuivre se comporte comme une résistance métallique.***

En particulier, nous pouvons déterminer sa ***résistance intérieure*** $r = U : I = 6$ *ohms*.

C'est la résistance d'une colonne d'électrolyte; on peut la calculer approximativement par la formule $R = \rho \frac{l}{s}$. Pour une solution à 10 % de SO_4Cu : $\rho = 32\ \Omega$. cm; la distance entre électrodes est $l = 5$ cm, la surface immergée $s = 25\ cm^2$; d'où $R = 32 \times \frac{5}{25} \simeq 6\Omega$

2. Expérience avec une cuve plomb-acide sulfurique-plomb.

Utilisons une cuve à électrolyse dont les électrodes sont en plomb et dont l'électrolyte est une solution à 10 % d'acide sulfurique dans l'eau.

a) *L'interrupteur est ouvert*; le voltmètre ne dévie pas, la tension entre les électrodes est nulle (fig. 2 a).

b) *Fermons l'interrupteur*. Le courant traverse la cuve, la solution d'acide sulfurique s'électrolyse (fig. 2 b).

Notons pour quelques valeurs de l'intensité I, la tension U aux bornes de la cuve :

I	0,5	1	1,5	2	*ampères*
U	2,6	3,2	3,8	4,4	*volts*
U/I	5,2	3,2	2,5	2,2	

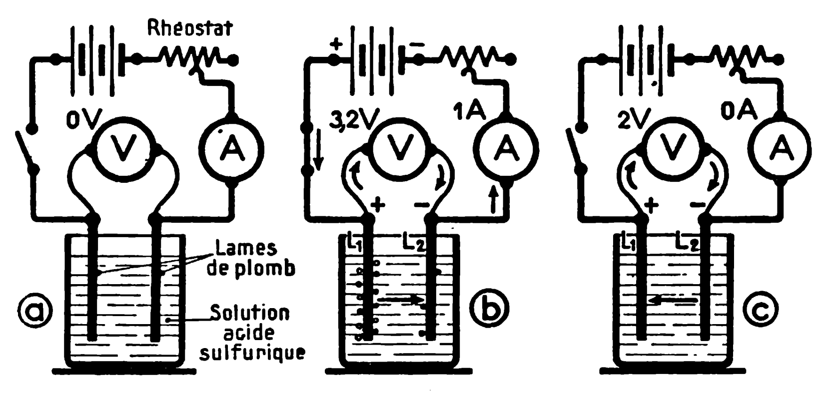


Fig. 2. — Cuve plomb-acide sulfurique-plomb :
a) ***avant passage du courant***, cuve symétrique : le voltmètre ne dévie pas.
b) le courant traverse la cuve, il y a électrolyse de l'acide sulfurique.
c) ***après passage du courant***, cuve dissymétrique : le voltmètre dévie. Il y a une f. é. m.

La tension aux bornes de la cuve n'est pas proportionnelle à l'intensité du courant.

Mesurons la longueur l et la surface s de la colonne d'électrolyte qui constitue le conducteur et calculons sa résistance r.

$$l = 5 \text{ cm}, \quad s = 15 \text{ cm}^2, \quad \rho = 3{,}6\ \Omega\text{cm pour } SO_4H_2 \text{ à } 10\ \%$$

$$r = 3{,}6 \frac{5}{15} = 1{,}2\,\Omega.$$

Si la cuve se comportait comme une résistance métallique le courant d'intensité 2 A correspondrait à une tension $U = 1{,}2 \times 2 = 2{,}4$ V. Ce n'est pas le cas.

c) *Ouvrons l'interrupteur,* l'intensité devient nulle. *Le voltmètre dévie encore* et indique une tension d'environ 2 *volts* (fig. 2 c).

La cuve se comporte comme un générateur de f. é. m. 2 *volts.*

La déviation du voltmètre n'a pas changé de sens, ce générateur a donc pour pôle + l'électrode qui servait d'anode pendant le fonctionnement en cuve à électrolyse.

3. Expliquons les faits observés.

Avant passage du courant, dans chacun des électrolyseurs étudiés, les deux électrodes sont identiques; l'électrolyte, autour de l'anode, est le même qu'autour de la cathode. Chaque cuve, du point de vue chimique, est *symétrique.*

Pendant le passage du courant :

1° Dans la cuve : ***cuivre-sulfate de cuivre-cuivre,*** le sulfate de cuivre s'électrolyse, du cuivre se dépose à la cathode, du cuivre se dissout à l'anode, mais les deux électrodes restent chimiquement les mêmes. *L'électrolyte* ne subit pas de modification, il *s'échauffe* simplement. *La cuve reste symétrique.* Elle se comporte comme une ***résistance.*** L'énergie électrique se transforme uniquement en chaleur.

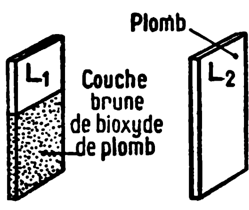


Fig. 3. — La lame L_1 s'est oxydée. Elle est recouverte de bioxyde de plomb brun. La lame L_2 n'a pas changé.

2° Dans la ***cuve : plomb-acide sulfurique-plomb,*** de l'hydrogène se dégage à la cathode L_2. L'oxygène qui apparait sur l'anode L_1 oxyde cette électrode, il se forme du *bioxyde de plomb* de couleur brune. L'électrolyte ne subit pas de modification chimique, il s'échauffe.

Les deux électrodes sont devenues chimiquement différentes, nous pouvons le constater en les examinant (fig. 3). La cuve est *dissymétrique.*

Elle se comporte comme une pile de f. é. m. 2 *volts. La cuve s'est polarisée.*

4. Force contre-électromotrice d'un récepteur chimique.

Lorsqu'une cuve à électrolyse est alimentée par un générateur, le courant est produit par ce générateur. La f. é. m. engendrée dans la cuve elle-même s'oppose au passage du courant due au générateur, c'est pourquoi on l'appelle ***force contre-électromotrice E'*** de la cuve.

Une cuve à électrolyse a une force contre-électromotrice (f. c. é. m.) lorsque le passage du courant polarise les électrodes.

La grandeur de cette f. c. é. m. ne dépend que de la nature des électrodes et de l'électrolyte, puisqu'il s'agit du même phénomène que la f. é. m. d'une pile hydroélectrique.

5. Cherchons une relation entre la tension aux bornes et l'intensité du courant.

Soit U la tension aux bornes de la cuve, E' la f. c. é. m.; c'est en définitive une tension (U — E') qui produit le courant. La résistance de la cuve étant *r*, l'intensité du courant est :

$$I = \frac{U - E'}{r}$$

formule que l'on peut encore écrire :

$$U = E' + rI. \qquad (1)$$

Avec les résultats expérimentaux du paragraphe 2, traçons un graphique en portant horizontalement (en abscisses) l'intensité I et verticalement (en ordonnées) la valeur correspondante de la tension U (fig. 4). Ce graphique représente la tension U aux bornes d'une cuve Pb — SO_4H_2 — Pb en fonction de l'intensité du courant I dans la cuve. C'est une *droite*, U est donc bien une *fonction linéaire*[1] de I.

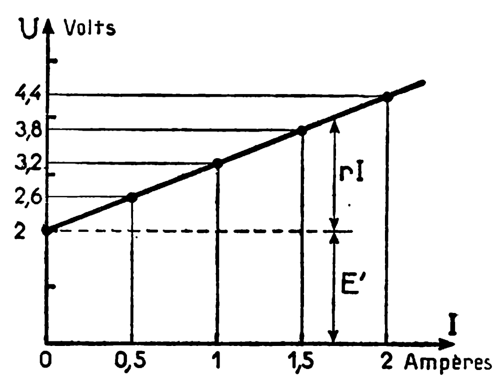


Fig. 4. — Graphique des variations de la tension aux bornes d'une cuve plomb-acide sulfurique en fonction du courant. U est une fonction linéaire de I de la forme $y = ax + b$ où $U = y$, $I = x$, $r = a$ et $E' = b$.

Cette droite ne passe pas par l'origine, elle rencontre l'axe des tensions en un point d'ordonnée 2 *volts*. C'est la tension aux bornes

1. Fonction de la forme : $y = ax + b$.

de la cuve lorsque le courant est nul, c'est aussi la f. c. é. m. de cette cuve.

Le simple examen de ce graphique nous donne une vérification de la formule (1) établie ci-dessus.

6. Un moteur a aussi une force contre-électromotrice.

Expériences. — Voici un moteur de ventilateur construit pour fonctionner sous une tension de 110 *volts*.

a) Alimentons ce moteur[1] par un élément d'accumulateur et *empêchons-le de tourner* (fig. 5 a). Un voltmètre polarisé indique la tension entre ses bornes : 2 *volts*; un ampèremètre mesure le courant : 1 *ampère*.

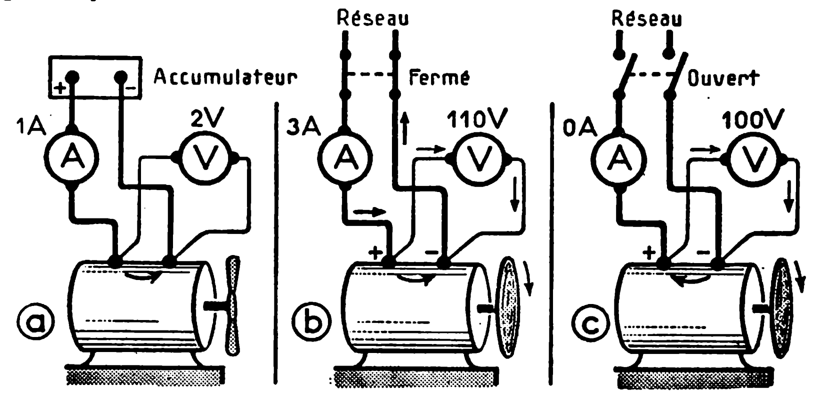


Fig. 5. — Mise en évidence de la f. c. é. m. d'un moteur :
a) ***Le moteur ne tourne pas,*** **il ne fournit pas de travail, c'est une résistance.**
b) ***Le moteur tourne,*** **il fournit du travail. Une f. c. é. m. tend à s'opposer au passage du courant.**
c) ***Le courant est coupé,*** **le moteur tourne : le voltmètre dévie dans le même sens que précédemment. Il y a une f. é. m.**

Le moteur ne tourne pas; il ne fournit donc pas d'énergie mécanique. L'énergie qu'il reçoit se transforme uniquement en chaleur; *dans ces conditions*, c'est une *résistance morte* dont la valeur $r = 2 : 1 = 2$ *ohms*. C'est la ***résistance intérieure*** du moteur.

b) Appliquons maintenant entre les bornes du moteur une tension de 110 *volts* et *laissons-le tourner*.

Le voltmètre indique 110 V, l'ampèremètre 3 A (fig. 5 b). Or, la loi d'Ohm, $I = U : r$ pour une résistance morte, donne pour l'intensité $110 : 2 = 55$ A, valeur beaucoup plus grande que celle mesurée. Cette loi n'est donc plus applicable.

1. Il est commode d'utiliser un moteur de faible puissance à *excitation indépendante*.

C'est que dans le *moteur en rotation*, comme dans une cuve à électrolyse polarisée, il existe une f. é. m. E′ qui tend à s'opposer au passage du courant, c'est-à-dire une ***force contre-électromotrice***.

c) *Coupons le courant;* le moteur continue à tourner quelque temps en ralentissant peu à peu. Tant qu'il tourne, *le voltmètre dévie dans son sens primitif* (fig. 5 c) *la tension qu'il indique diminue lentement pendant que le moteur* ralentit. Elle était d'environ 100 V aussitôt après la coupure du courant; elle est nulle quand le moteur s'arrête.

Nous vérifions ainsi que le moteur possède une f. c. é. m. tant qu'il tourne et nous constatons en outre que cette f. c. é. m. diminue avec la vitesse.

Un raisonnement identique à celui fait au paragraphe 5 nous permet d'établir la relation :

$$\boxed{U = E' + rI} \qquad (1)$$

Elle traduit la ***loi d'Ohm pour un récepteur mécanique ou chimique***. Cette formule nous montre en particulier que :

la tension aux bornes d'un récepteur mécanique ou chimique est toujours plus grande que sa force contre-électromotrice.

Le produit rI est la *chute interne de tension*.

7. Une définition précise de la force contre-électromotrice d'un récepteur.

Considérons le moteur fonctionnant en régime permanent. Pendant t *secondes*, l'intensité étant I *ampères*, il est traversé par une quantité d'électricité $It = Q$ *coulombs*.

Multiplions par It les deux membres de la formule (1) :

$$UIt = E'It + rI^2t$$

UIt mesure l'énergie électrique fournie au moteur pendant le temps t.

rI^2t mesure l'énergie électrique transformée en chaleur pendant le même temps.

Leur différence $E'It$ représente donc l'énergie électrique transformée en énergie mécanique[1] pendant le temps t. L'*énergie mécanique* W

1. Revoir : 8e leçon, page 45.

fournie par le moteur est aussi égale à $E'It$ ou $E'Q$. On en déduit :

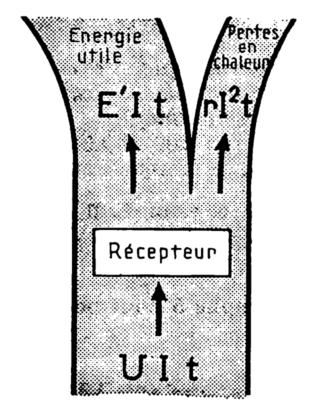


Fig. 6. — **Bilan énergétique du fonctionnement d'un récepteur.**

$$\underset{volts}{E'} = \frac{W_{\,joules}}{Q_{\,coulombs}}$$

Notre raisonnement, fait ici pour un moteur, reste valable pour tout récepteur produisant de l'énergie sous une autre forme que l'énergie calorifique. Par exemple, pour une cuve à électrolyse l'énergie W représente l'énergie chimique mise en jeu par le phénomène d'électrolyse.

Nous pouvons alors donner de la f. c. é. m. d'un récepteur la définition :

la force contre-électromotrice E′ d'un récepteur mesure l'énergie électrique transformée en énergie chimique ou mécanique pour chaque coulomb qui le traverse.

8. Rendement électrique d'un récepteur.

Le courant fournit au récepteur une énergie UIt; l'énergie utilement transformée dans le récepteur est $E'It$; le ***rendement électrique*** de cette transformation est :

$$\eta = \frac{\text{énergie utilement transformée}}{\text{énergie électrique reçue}} = \frac{E'It}{UIt} = \frac{E'}{U}.$$

C'est un nombre toujours inférieur à 1.

Par exemple, pour le moteur étudié ci-dessus :

$$U = 110\ \text{V} \qquad r = 2\Omega \qquad I = 3\ \text{A}$$

donc

$$E' = 110 - 2 \times 3 = 104\ \text{V}$$

$$\eta = \frac{104}{110} = 0{,}945 \text{ ou } 94{,}5\ \%.$$

Remarquons que l'énergie utilement transformée W ne peut être entièrement recueillie sur l'arbre du moteur car il y a des pertes mécaniques (frottements sur les paliers ou dans l'air). Comme pour les générateurs, on peut définir un ***rendement industriel***, toujours plus petit que le rendement électrique.

Résumé.

1. — Un récepteur chimique ou mécanique a une résistance r et une force contre-électromotrice E' qui s'opposent au passage du courant.

2. — Une cuve à électrolyse a une f. c. é. m. lorsqu'elle se polarise.

3. — La tension U aux bornes d'un récepteur est toujours plus grande que sa f. c. é. m. E', elle est donnée par la loi d'Ohm appliquée à un récepteur :

$$\underset{\textit{volts}}{U} = \underset{\textit{volts}}{E'} + \underset{\textit{ohms}}{r}\ \underset{\textit{ampères}}{I}.$$

4. — La force contre-électromotrice d'un récepteur mesure l'énergie électrique transformée en énergie chimique ou mécanique pour chaque coulomb qui traverse le récepteur :

$$E' = W/Q.$$

5. — Le rendement électrique d'un récepteur est égal au rapport de sa f. c. é. m E' à la tension entre ses bornes U :

$$\eta = E'/U.$$

Exercices.

1. Quand l'intensité du courant qui traverse une cuve à électrolyse est 5 A, la tension aux bornes de la cuve est 1,58 V. Quand l'intensité est 8 A, la tension est 1,88 V. Calculer la f. c. é. m. de la cuve et sa résistance.

2. 1° Dans une cuve où l'on électrolyse de l'alumine, on recueille en moyenne 6,700 *kg* d'aluminium par heure. Quelle est l'intensité moyenne du courant qui traverse l'électrolyte?

2° La f. c. é. m. de la cuve étant égale à 2,8 *volts* et la d. d. p. à ses bornes étant de 5 *volts*, calculer sa résistance intérieure.

3° Quelle est la puissance utilisée dans la cuve, d'une part sous forme calorifique, d'autre part sous forme chimique? Calculer alors l'énergie chimique nécessaire pour mettre en liberté 1 gramme d'aluminium.

Données : l'aluminium est trivalent et a une masse atomique de 27. Il faut 96 500 *coulombs* pour libérer 1 *g* d'hydrogène.

3. On mesure la tension aux bornes d'une cuve fer-soude-fer pour plusieurs intensités de courant. On relève les résultats suivants :

U	1,9	2,3	2,6	3	*volts*
I	0,25	0,5	0,75	1	*ampère*

a) Représenter graphiquement la tension U en fonction de l'intensité I et interpréter la courbe obtenue.

b) A partir de ce graphique déterminer la f. c. é. m. et la résistance intérieure de la cuve.

4. Un moteur électrique absorbe un courant d'intensité 20 *A* et fournit une puissance mécanique de 3 *ch*. Il consomme en 10 *mn* une énergie électrique de 420 *Wh*. Calculer la f. c. é. m. du moteur, la tension d'alimentation, le rendement électrique et la résistance du moteur.

5. Un moteur de machine à coudre a une puissance utile de 0,125 *ch*, son rendement électrique est alors 0,6. Sachant qu'il est alimenté sous 120 *V*, calculer :

a) l'intensité du courant, la f. c. é. m. et la résistance du moteur;

b) la quantité de chaleur dégagée dans le moteur en 30 *mn*. Les pertes d'énergie mécanique par frottements sont négligeables.

Étude expérimentale d'un accumulateur.

---

1. Description d'un élément d'accumulateur au plomb, fabrication Tudor.

Examinons un élément de batterie stationnaire *chargé.*

Il se compose de plaques de plomb disposées dans un vase en verre rempli d'acide sulfurique dilué. Ces plaques, alternativement *négatives* et *positives* (fig. 1 et 2), reposent par des talons sur les bords du vase dans lequel elles sont ainsi suspendues. Les plaques extrêmes sont

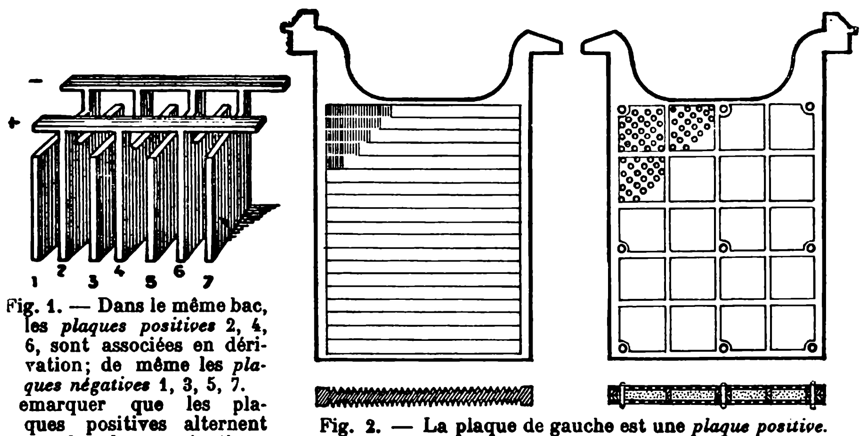


Fig. 1. — Dans le même bac, les *plaques positives* 2, 4, 6, sont associées en dérivation; de même les *plaques négatives* 1, 3, 5, 7. Remarquer que les plaques positives alternent avec les plaques négatives.

Fig. 2. — La plaque de gauche est une *plaque positive.* La plaque de droite est une *plaque négative.*

négatives. Les plaques de même nom sont soudées à une barre de connexion pour former un groupe négatif et un groupe positif. Chaque plaque est séparée de sa voisine par un séparateur en bois.

a) Plaques positives. Chaque plaque *positive* est en plomb pur, d'une seule pièce. Sur chaque face, des lamelles verticales très nombreuses en augmentent la surface. Ces lamelles sont réunies par de fortes nervures horizontales. Les plaques positives ont une couleur brun chocolat parce

que le plomb qui les constitue a été transformé superficiellement en oxydes supérieurs de plomb.

Cette couche d'oxydes est la *matière active positive* (fig. 3).

b) ***Plaques négatives.*** Chaque *plaque négative* est formée de deux grilles rivées l'une sur l'autre. Une grille est faite de larges mailles de plomb allié à de l'antimoine coulées sur un voile de plomb pur perforé de petits trous. Les mailles sont remplies de la *matière active négative* qui est du plomb pur spongieux. Les deux grilles étant appliquées l'une contre l'autre, la matière active est enfermée dans une série de caissettes perforées qui empêchent sa chute. Les plaques négatives de l'élément chargé sont gris ardoise.

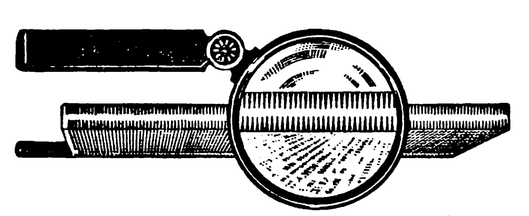


Fig. 3 — Aspect à la loupe d'une tranche de plaque positive.

Des *séparateurs* en bois poreux maintiennent les plaques à 1 *cm* les unes des autres pour qu'elles ne puissent se toucher.

c) ***Électrolyte.*** L'électrolyte est de l'eau distillée additionnée d'*acide sulfurique très pur* (fabriqué en partant de soufre et non de pyrites). Sa densité est de 24° Baumé (7 volumes d'eau, 2 d'acide à 66° Baumé).

d) Le vase en verre a une profondeur dépassant de plusieurs centimètres la partie inférieure des plaques, pour que les matières actives qui tombent parfois ne court-circuitent pas les plaques.

2. Décharge d'un élément d'accumulateur.

Faisons débiter l'accumulateur sur une résistance réglable en intercalant un ampèremètre dans le circuit et en plaçant un voltmètre aux bornes de l'élément (fig. 4). L'intensité sera maintenue constante pendant toute l'expérience à raison d'environ un ampère par kilogramme de plaques.

a) ***Variations de la f. é. m.*** Nous relèverons les indications du voltmètre tous les quarts d'heure en coupant le courant pendant la lecture. Les résultats obtenus sont résumés par la courbe de la figure 5.

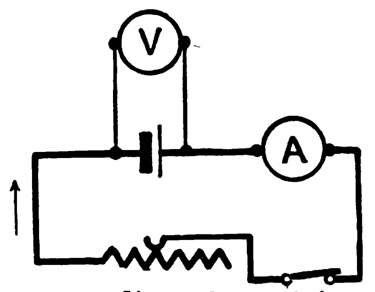


Fig. 4. — L'accumulateur se décharge. La flèche indique le sens du courant. Quel est ce sens à l'extérieur de l'accumulateur? à l'intérieur?

La f. é. m. baisse très vite pendant les premières minutes de la décharge,

puis se maintient longtemps entre 1,95 volt et 1,85 volt; sa diminution devient ensuite plus rapide. On arrête la décharge quand la f. é. m. atteint 1,8 volt.

b) Variations de la densité de l'électrolyte. Avec un aréomètre Baumé, on mesure la densité de l'électrolyte pendant la décharge. Cette densité diminue de 24° B à 20° B. Comme le volume du liquide ne varie pas, c'est donc que de l'acide sulfurique disparaît.

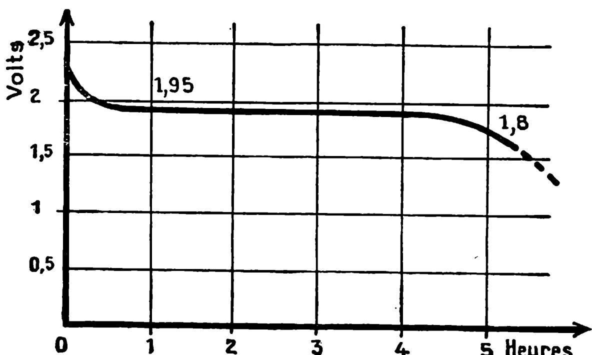


Fig. 5. — Variation de la force électromotrice d'un accumulateur pendant la décharge. Décrivez cette variation.

c) Couleur des plaques.

Les positives, de brun foncé, deviennent brun clair à la fin de la décharge. Les négatives, qui étaient gris ardoise, blanchissent un peu.

d) Indices de fin de décharge.

La f. é. m., la densité de l'électrolyte, la couleur des plaques indiquent la fin de la décharge.

Le meilleur indice est la f. é. m. Un accumulateur est pratiquement déchargé quand sa f. é. m. est de 1,8 volt. Toutefois, si un accumulateur déchargé est laissé au repos, sa f. é. m. remonte lentement jusqu'à 2 volts environ. Pour être sûr qu'il est déchargé, il faut le faire débiter pendant dix minutes ou un quart d'heure avant de mesurer sa f. é. m.

3. Charge d'un élément d'accumulateur.

Un élément d'accumulateur déchargé doit être rechargé dans la journée, sinon l'acide sulfurique attaque la matière active négative en formant du sulfate de plomb (SO_4Pb) indécomposable lors de la charge : l'accumulateur est détérioré, on dit qu'il est *sulfaté.*

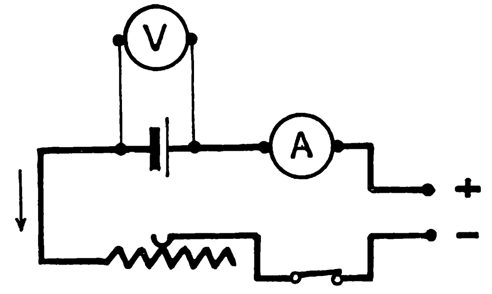


Fig. 6. — L'accumulateur se charge. Le courant entre par le pôle positif et sort par le pôle négatif de l'accumulateur.

Expérience : Montons l'élément sur la distribution de courant continu, de manière que le courant de charge arrive par la borne positive et sorte par l'autre borne; intercalons dans le circuit un rhéostat, un ampèremètre et un interrupteur. Plaçons un voltmètre aux bornes de l'élément (fig. 6). L'intensité de charge sera maintenue constante (environ un ampère par kilogramme de plaques) pendant toute l'expérience.

a) Variations de la f. é. m. (fig. 7). Elle croît d'abord très vite de 1,8 V. à 2,1 V., puis très lentement jusqu'à 2,2 V. et enfin rapidement jusqu'à 2,6 V. L'élément est alors chargé.

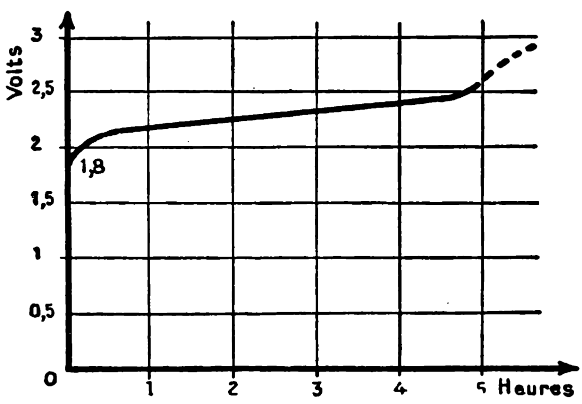


Fig. 7. — Variation de la force électromotrice d'un accumulateur pendant sa charge. Décrivez cette variation.

b) Variations de l'électrolyte. Sa densité croît graduellement de 20° B à 24° B. Elle reste alors constante. A ce moment le liquide bouillonne à grosses bulles : l'eau acidulée se décompose en hydrogène et oxygène.

c) Couleur des plaques. Les plaques positives sont devenues brun rouge, les négatives bleu ardoise. La matière active positive s'est gonflée, elle a foisonné.

d) Indices de fin de charge. La fin de la charge est indiquée pratiquement :

1° par le dégagement gazeux abondant sur les plaques positives et négatives;

2° par la f. é. m. de l'élément, 2,6 volts;

La densité de l'électrolyte, la couleur des plaques sont des indices moins précis. On n'oubliera pas que la f. é. m. d'un élément chargé laissé au repos descend assez vite à 2,4 V.

Résumé.

1. — Un élément d'accumulateur au plomb se compose de deux sortes de plaques de plomb plongées dans une solution d'acide sulfurique.

Les plaques positives sont couvertes d'une couche d'oxyde de plomb très oxygéné. La matière active des plaques négatives est du plomb pur spongieux.

2. — Pendant la décharge d'un élément d'accumulateur, la f. é. m. reste à peu près constante pendant plusieurs heures. Puis elle baisse : on arrête la décharge à 1,8 volt.

3. — Pendant la charge, la f. é. m. croît d'abord lentement, puis plus vite : on arrête la charge à 2,6 volts.

4. — L'acide sulfurique de l'électrolyte, la matière active des plaques participent aux réactions chimiques de fonctionnement de l'accumulateur.

Exercices.

1. Un élément de pile de f. é. m. 1,6 volt et de résistance intérieure 0,40 Ω est court-circuité par un conducteur de résistance négligeable. Quelle est l'intensité du courant de court-circuit?

2. Un élément d'accumulateur dont la f. é. m. est 2 volts a une résistance intérieure de 0,005 Ω. Quelle est l'intensité du courant qui se produirait et détériorerait l'appareil si on court-circuitait les bornes avec un conducteur de résistance négligeable?

3. Pour charger un élément d'accumulateur, on lui fournit 40 A*h*. A la décharge, l'élément débite 36 A*h*. *Quel est son rendement en quantité?*

A la charge, la tension moyenne aux bornes est 2,2 volts; à la décharge, elle est 1,9 volt; Quel est *le rendement en énergie?*

4. On a un accumulateur dont les plaques pèsent 50 *kg* par électrode. On le charge à raison de 0,5 A par *kg* de plaques et la charge dure 12 heures. La d. d. p. pendant la charge est de 2,2 V.

On demande :

1° La capacité[1] de l'accumulateur à la charge;

2° L'énergie absorbée pendant la charge;

3° La puissance correspondante.

On décharge ensuite cet accumulateur en 10 heures avec une intensité de 50 ampères et sous une tension de 1,8 V.

On demande :

4° La capacité de l'accumulateur à la décharge;

5° L'énergie restituée par l'accumulateur;

6° Le rendement en énergie;

7° Le rendement en quantité.

(Concours pour l'emploi d'Inspecteur du Travail.)

1. Il serait préférable de dire : la quantité d'électricité nécessaire à la charge.

Théorie de l'accumulateur au plomb. Constantes d'un élément.

---

1. La chimie de l'accumulateur est encore mal connue.

Les savants n'ont pas encore donné une explication indiscutable de tous les phénomènes qui se produisent dans un élément d'accumulateur au plomb pendant la charge et la décharge [1]. Nous n'étudierons pas et ne comparerons pas les différentes théories proposées, nous nous contenterons de résumer la théorie la plus récente, celle de M. Féry.

Décharge de l'accumulateur. — Au début de la décharge, les plaques positives sont couvertes d'un oxyde de plomb très oxygéné, le *pentoxyde* Pb^2O^5; la matière active négative est du *plomb pur*.

Le courant, à l'intérieur de l'élément, passe des plaques négatives aux positives. Il électrolyse l'acide sulfurique: l'hydrogène formé réduit partiellement le pentoxyde; l'ion SO_4 donne avec le plomb du sulfate plombeux SO_4Pb_2 (qui n'est pas le sulfate blanc, SO_4Pb, ou sulfate plombique) :

sens du courant dans l'électrolyte

Plaques négatives ⟶ ***Plaques positives***

Réaction princip. : $SO_4 \longleftarrow SO_4H_2 \longrightarrow H_2$

Réactions second. : $SO_4 + 2Pb \longrightarrow SO_4Pb_2$ $Pb_2O_5 + H_2 \longrightarrow 2PbO_2 + H_2O$

En résumé : $SO_4H_2 + 2Pb + Pb_2O_5 \longrightarrow H_2O + SO_4Pb_2 + 2PbO_2$

(*Solution*) (*Plaque* —) (*Plaque* +) (*Solution*) (*Plaque* —) (*Plaque* +)

Charge de l'accumulateur. — Le courant a changé de sens :

sens du courant dans l'électrolyte

Plaques négatives ⟵ ***Plaques positives***

Réaction princ. : $H_2 \longleftarrow SO_4H_2 \longrightarrow SO_4$

Réactions second. : $SO_4Pb_2 + H_2 \longrightarrow SO_4H_2 + 2Pb$ $SO_4 + H_2O \longrightarrow SO_4H_2 + O$

$2\,PbO_2 + O \longrightarrow Pb_2O_5$

En résumé : $H_2O + SO_4Pb_2 + 2PbO_2 \longrightarrow SO_4H_2 + 2Pb + Pb_2O_5$

(*Solution*) (*Plaque* —) (*Plaque* +) (*Solution*) (*Plaque* —) (*Plaque* +)

Charge et décharge produisent donc des effets chimiques exactement inverses.

On remarquera que cette théorie explique que de l'acide sulfurique disparaît à la décharge pour reparaître à la charge.

1. Les produits chimiques qui se forment à la surface des plaques sont instables en conséquence très difficiles à analyser avec précision.

2. Un élément d'accumulateur est caractérisé par ses constantes.

1. ***Force électromotrice.*** — Ses variations sont peu importantes pendant la plus grande partie de la décharge. Elle reste voisine de 2 volts.

2. ***Résistance intérieure.*** — Les plaques ont une grande surface, elles sont rapprochées les unes des autres, l'électrolyte est concentré; aussi la résistance intérieure est-elle très faible. Elle est comprise entre 0,01 Ω pour les petits accumulateurs portatifs et 0,001 Ω et même moins pour les gros éléments stationnaires.

3. ***Capacité.*** — On mesure expérimentalement la capacité d'un accumulateur en déchargant cet accumulateur comme nous l'avons fait dans la 27e leçon § 2. Il est facile d'agir sur le rhéostat, de temps à autre, pour maintenir l'intensité constante. Si l'accumulateur a fourni I ampères pendant *t* heures, la capacité de l'élément est I*t* ampères heures.

La capacité est plus grande à décharge lente qu'à décharge rapide : par exemple, pour un type d'élément Tudor, elle est de 36 *Ah* en 10 heures et seulement de 19 *Ah* en 1 heure.

Plus la surface des plaques est grande, plus la capacité est grande; le poids de l'élément est aussi plus grand. Les plaques d'un élément Tudor de 36 *Ah* en 10 *h* pèsent environ 8 *kg*; celles d'un élément de 180 *Ah* en 10 *h* pèsent 28 *kg*. La capacité par kilogramme de plaques est 4,5 *Ah* pour le premier type, 6,5 *Ah* pour le second. On fabrique des éléments pesant plus de 5 tonnes, d'une capacité de 25 000 *Ah*.

3. Les accumulateurs au plomb sont des appareils lourds et délicats.

Une qualité importante des accumulateurs au plomb est la constance de leur f. é. m.

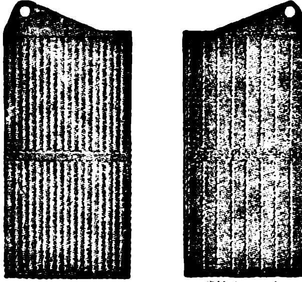
Mais ils sont lourds. De plus, à cause de la constitution des plaques et des phénomènes chimiques dont elles sont le siège, les accumulateurs doivent être traités avec précaution. Les plaques se gondolent, la matière active se détache. Les accumulateurs déchargés se sulfatent. Il faut les charger et les décharger à un régime modéré. Si on complète le volume de l'électrolyte avec de l'eau ordinaire qui contient des chlorures ou avec de l'acide sulfurique ordinaire dans lequel il y a toujours de l'arsenic, les plaques se détériorent.

Un élément supporte de 200 à 1 000 charges et décharges suivant sa qualité et la manière dont on l'emploie.

4. Il existe des accumulateurs à électrolyte alcalin : accumulateurs fer-nickel, ou cadmium-nickel.

On cherche depuis longtemps à fabriquer des accumulateurs plus légers et plus robustes que ceux au plomb.

Parmi les nombreux modèles qui ont été inventés, les accumulateurs alcalins fer-nickel et cadmium-nickel sont assez employés.



Cliché SAFT.

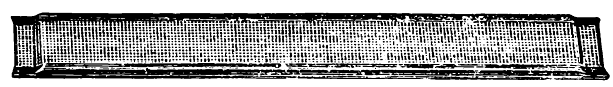
Fig. 1. — A gauche, plaque positive d'accumulateur alcalin. A droite, plaque négative.

a. ***Description.*** — *L'électrode positive* de l'accumulateur fer-nickel est faite d'un mélange d'hydroxyde de nickel et de nickel en poudre tassé dans des tubes en acier nickelé finement perforés et montés dans un cadre en acier nickelé (fig. 1, 2 et 3).

L'électrode négative est de l'hydroxyde ferreux logé dans de petites boîtes, en feuillard d'acier nickelé percé de petits trous. Une plaque est constituée par un certain nombre de ces boîtes serties à la presse dans une monture en acier.

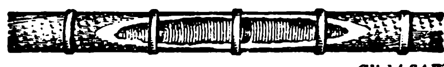
Les plaques sont séparées les unes des autres par des tiges d'ébonite. Les barrettes connectant les plaques de même polarité sont en acier et l'ensemble est placé dans un bac en tôle d'acier nickelé fermé par un couvercle soudé avec un bouchon à fermeture hermétique.





Cliché SAFT.

Fig. 2. — En haut, tube en acier nickelé, finement perforé, contenant la matière active positive.
En bas, petite boîte en acier nickelé perforé contenant la matière active négative.



Cliché SAFT

Fig. 3. — Voyez à l'intérieur du tube — dont on a enlevé une partie de la paroi — la matière active positive.

L'électrolyte est une solution de potasse à 20 %.

b. ***Fonctionnement.*** — Pendant la charge, l'oxyde de nickel est oxydé et l'oxyde de fer réduit; l'inverse se produit pendant la décharge :

$$2\,Ni\,(OH)_2 + Fe\,(OH)_2 \underset{décharge}{\overset{charge}{\rightleftarrows}} 2\,Ni\,(OH)_3 + Fe.$$

A la décharge, la tension varie de 1,3 V à 1,1 V pour tomber ensuite très vite à 0,6 V (fig. 4).

Pendant la charge, qui doit durer environ 7 heures, la tension varie de 1,6 V à 1,7 V, puis croît à la fin jusqu'à 1,85 V.

c. ***Avantages et inconvénients.*** — L'*accumulateur fer-nickel* fournit **une f. é. m. plus faible et moins constante que l'accumulateur au plomb, mais il est plus léger et *beaucoup plus robuste*. Il dure au moins pendant 1 000 décharges; il peut rester très longtemps déchargé sans inconvénient. Il est plus cher que l'accumulateur au plomb.**

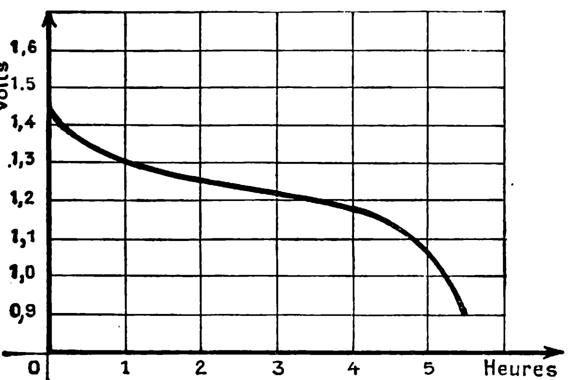


Fig. 4. — Décharge en 5 heures d'un **accumulateur alcalin**
Décrivez la variation de sa force électromotrice

L'*élément cadmium-nickel* ne diffère de l'élément *fer-nickel* que par la matière active négative qui est de l'hydrate de cadmium. Les propriétés sont à peu près les mêmes que celles des éléments fer-nickel. On préfère les éléments cadmium-nickel dans le cas de charges très lentes, ou quand les batteries sont soumises à de basses températures, ou encore quand elles doivent conserver longtemps la charge à circuit ouvert.

LECTURE

Planté invente l'accumulateur au plomb.

C'est un physicien français, ***Gaston Planté****, né en* 1834, *mort en* 1889, *qui inventa l'accumulateur au plomb. Le premier élément d'accumulateur fut présenté à l'Académie des Sciences le* 26 *mars* 1860.

Il se composait de deux longues et larges lames minces de plomb d'une surface de **50 dm²**, *séparées par une toile grossière, enroulées en spirale et placées dans un vase cylindrique en verre rempli d'eau acidulée sulfurique au dixième.*

Pour « former » l'accumulateur, Planté procédait de la façon suivante : « On le fait traverser le premier jour, six ou huit fois alternativement dans les deux sens, par le courant de deux éléments Bunsen[1]*. On décharge le couple secondaire entre chaque changement de sens et on constate que la durée de la décharge va sans cesse en croissant. On augmente peu à peu le temps pendant lequel le couple reste soumis, dans le même sens, à l'action du courant primaire. On porte successivement cette durée, dès le premier jour, d'un quart d'heure à une demi-heure et une heure. On le laisse finalement chargé dans un sens déterminé jusqu'au lendemain.*

1. Les piles Bunsen étaient autrefois très employées à cause de leur grande force électromotrice (voisine de deux volts).

Le lendemain, on le recharge deux heures en sens inverse, puis dans le premier sens, et ainsi de suite. On constate encore un gain dans la durée de la décharge. Mais il arrive bientôt une limite au delà de laquelle cette durée n'augmente plus sensiblement. »

Ces charges, décharges, inversions, avec périodes de repos ont pour but de produire, à la surface des plaques de plomb, une couche de matière active d'épaisseur suffisante. Ce mode de formation, nommé formation Planté, *est encore employé, bien qu'il soit lent et coûteux, parce qu'il fournit des éléments robustes.*

La plupart des fabricants obtiennent une formation plus rapide *et une* capacité plus grande *en recouvrant les plaques d'une pâte faite surtout de litharge* (PbO) *pour les négatives, de minium* ($Pb\text{-}O_4$) *pour les positives, gâchée avec de l'acide sulfurique. La première charge suffit alors pour former la matière active; mais elle dure longtemps : par exemple,* 3 *jours sans arrêt.*

Résumé.

1. — Théorie de l'accumulateur au plomb :

A la décharge :	**plaques positives**	$Pb_2O_5 + H_2 \longrightarrow 2\,PbO_2 + H_2O$
	plaques négatives	$2\,Pb + SO_4 \longrightarrow SO_4Pb_2$
A la charge :	**plaques positives**	$2\,PbO_2 + O \longrightarrow Pb_2O_5$
	plaques négatives	$SO_4Pb_2 + H_2 \longrightarrow SO_4H_2 + 2\,Pb.$

2. — Un élément d'accumulateur au plomb possède une f. é. m. voisine de 2 volts, sa résistance intérieure est pratiquement négligeable, sa capacité est en moyenne de 5 Ah par kilogramme de plaques.

3. — C'est un appareil lourd et difficile à tenir en bon état.

4. — Des accumulateurs fer-nickel ou cadmium-nickel sont quelquefois préférés aux accumulateurs au plomb pour équiper des tracteurs légers ou constituer des batteries portatives de laboratoires.

Batterie[1] d'accumulateurs

1. Les éléments d'accumulateurs ne se montent pas en parallèle, mais en série.

a) Si l'on couplait en parallèle deux éléments ayant l'un une f. é. m. de 1,9 volts, l'autre une f. é. m. de 2,1 volts et une résistance intérieure de 0,001 d'ohm, sans circuit

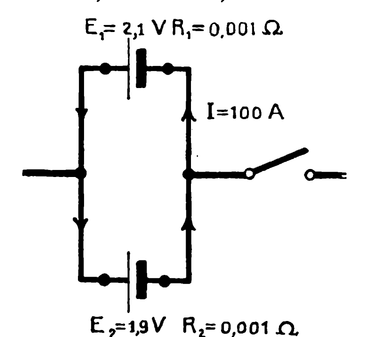
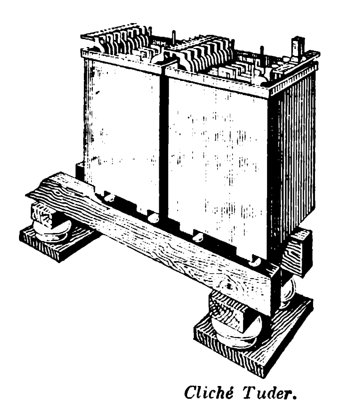


Fig. 1. — Quand les f. é. m. de deux éléments couplés en parallèle sont un peu différentes, il se produit un *courant de circulation* intense.



Cliché Tuder.

Fig. 2. — Les accumulateurs des batteries stationnaires sont soigneusement isolés du sol. Les éléments sont couplés en série; les connexions sont soudées.

extérieur (fig. 1), le courant qui circulerait dans les deux éléments serait

$$I = \frac{2,1 - 1,9}{0,001 \times 2} = 100\,A$$

courant intense capable de détériorer les éléments.

C'est donc parce que les f. é. m. des éléments peuvent être différentes et produire des courants intérieurs de grande intensité que *l'on évite le couplage en parallèle.*

b) Dans le montage en série, comme pour les éléments de piles, les f. é. m. et les résistances intérieures s'ajoutent.

La capacité de la batterie est la même que celle d'un élément; en effet, tous les éléments d'une même batterie ont sensiblement la *même capa-*

1. Ici, le mot *batterie* a même sens que le nom *ensemble*; une batterie d'accumulateurs est un ensemble d'éléments d'accumulateurs, comme une batterie de cuisine est un ensemble d'ustensiles de cuisine.

cité, 60 ampères-heures, par exemple; quand l'un d'eux a débité cette quantité d'électricité, 60 *Ah*, tous les autres ont aussi débité 60 *Ah*, puisqu'ils sont montés en série (fig. 2); tous sont déchargés; la capacité de la batterie est donc 60 *Ah*, comme celle d'un seul élément.

Dans les automobiles, pour l'éclairage de la voiture, le démarrage et l'allumage du moteur, on emploie ou des batteries de 3 éléments, soit 6 volts, de 45 à 150 *Ah*, ou des batteries de 6 éléments, soit 12 volts, de 30 à 75 *Ah*.

Des camions électriques Sovel sont équipés d'une batterie de 44 éléments, soit 88 volts, de 560 *Ah*.

2. Pour que la batterie fournisse pendant la décharge une tension à peu près constante, elle doit comporter des éléments de réserve.

Certains appareils électriques, les lampes à incandescence par exemple, ne fonctionnent bien que si la tension à leurs bornes est sensiblement constante.

Pour donner 110 volts, avec des éléments récemment chargés dont la f. é. m. est 2,4 volts, il faut 110 : 2,4 = 46 éléments à la batterie.

La f. é. m. d'un élément en décharge descend au bout de peu de temps à 2 V; il faut alors 55 éléments.

En fin de décharge, quand chaque élément ne donne plus que 1,8 V; il en faut 60.

Fig. 3. — Réducteur de décharge.
Remarquez la résistance de protection et la cale isolante entre les deux balais.

Donc, aux 46 éléments de la batterie en circuit au début de la décharge, il faut ajouter, peu à peu, 14 *éléments de réserve* pour compenser la baisse de tension.

Cette insertion d'éléments dans le circuit doit s'effectuer sans couper le courant. On la réalise avec un ***réducteur de décharge*** (fig. 3) : c'est un commutateur dont le frottoir est composé de deux balais réunis par une résistance de protection *r*. On évite ainsi, quand le frottoir touche à la fois deux plots du commutateur, de court-circuiter l'élément d'accumulateur correspondant (fig. 3).

3. La charge d'une batterie exige un courant de sens constant.

Il faut disposer soit de *courant continu*, soit de *courant redressé*.

a) Courant continu. — Il est produit par une *dynamo-shunt* entraînée par un moteur mécanique ou un moteur à courant alternatif.

La charge peut s'effectuer de deux manières :

Soit à *intensité constante*. Un rhéostat est intercalé entre la batterie et la dynamo, on règle l'intensité du courant de charge et on la maintient

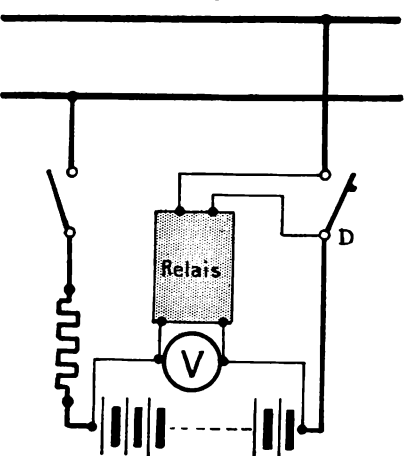


Fig. 4. — Charge d'une batterie à tension constante. Le relais ouvre automatiquement le disjoncteur D lorsque la tension aux bornes de la batterie atteint la valeur de fin de charge.

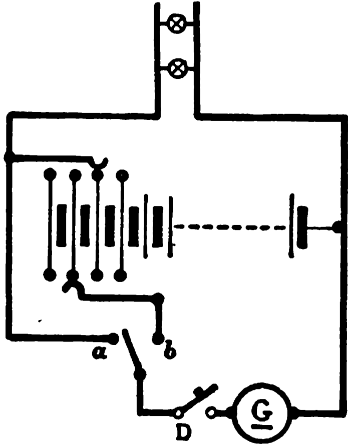


Fig. 5. — La dynamo G et la batterie peuvent alimenter le réseau en parallèle.
La batterie est munie d'un réducteur double de charge et de décharge.

constante pendant toute l'opération qui doit durer normalement une dizaine d'heures.

Soit *à tension constante*. On règle la tension de la dynamo pour qu'elle soit égale à la tension de la batterie à fin de charge et on place dans le circuit une résistance qui limite le courant initial. L'intensité du courant est grande au début de la charge, elle diminue ensuite au fur et à mesure que croît la f. é. m. de la batterie. C'est ainsi que l'on procède pour charger les batteries utilisées sur les véhicules électriques (fig. 4).

Si la batterie comporte des éléments de réserve, ces éléments qui ont été moins déchargés que les autres sont chargés plus rapidement et il faut les sortir du circuit au cours de la charge. On se sert d'un *réducteur de charge*, qui peut être le même appareil que celui que l'on emploie à la décharge.

Dans le cas où, pendant la charge, la batterie continue à alimenter à tension constante un circuit d'utilisation, un double réducteur est nécessaire, l'un pour la charge, l'autre pour la décharge (fig. 5).

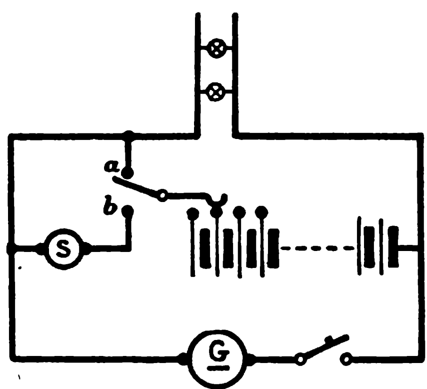


Fig. 6. — La dynamo G ne fournit que la tension du réseau. Un survolteur S est en série pour la charge de la batterie.

Enfin, il se peut que la dynamo ne puisse donner la tension nécessaire en fin de charge. On met en série avec elle une petite dynamo spéciale qui fournira le nombre de volts supplémentaires qui sont nécessaires et que l'on nomme un *survolteur* (fig. 6).

b) Courant redressé. — Il s'obtient avec du courant alternatif. — Le courant alternatif change de sens à intervalles de temps réguliers. La plupart des réseaux de distribution électrique fournissent à leurs abonnés du courant qui change de sens 100 fois par seconde; c'est du courant à 50 périodes.

Pour l'employer à la charge des accumulateurs, avec des appareils nommés *redresseurs*, on l'interrompt pendant chacune des demi-périodes où son sens ne convient pas à la polarité de la batterie.

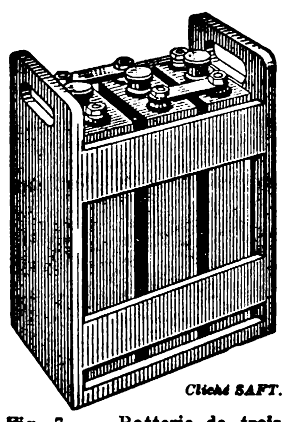


Fig. 7. — Batterie de trois accumulateurs alcalins.

Les principaux types de ces redresseurs sont :

les redresseurs à vapeur de mercure;
les lampes redresseuses;
les redresseurs cuivre-oxyde de cuivre.
Ils seront étudiés plus loin.



4. Les usages des accumulateurs sont très nombreux.

a) ***Batteries fixes ou stationnaires.***

Elles servent surtout de secours pour l'éclairage des magasins, des banques, des hôpitaux, des théâtres, des cinémas en cas de panne du secteur.

b) ***Batteries transportables.***

Elles sont utilisées dans les *sous-marins* pour fournir la puissance motrice en plongée.

Elles servent à la traction des *camions électriques*, des *tracteurs d'usines ou de gares*, à l'*éclairage des trains*.

c) ***Batteries de quelques éléments.***

Des batteries de 6, 12 ou 24 volts permettent le démarrage des automobiles, assurent l'allumage du moteur et l'éclairage de la voiture.

Elles remplacent les piles dans les installations téléphoniques et télégraphiques.

On les emploie dans les laboratoires (fig. 7).

Résumé.

1. — Pratiquement, les éléments d'accumulateurs s'associent en série pour fournir des batteries à la tension désirée.

Si une tension constante à la décharge est indispensable, la batterie comporte des éléments de réserve que l'on introduit un à un en circuit avec un réducteur de décharge.

2. — La charge d'une batterie s'effectue industriellement avec une dynamo shunt, à laquelle on ajoute parfois un survolteur. On procède le plus souvent à la charge à intensité constante. Un réducteur de charge est nécessaire si la batterie possède des éléments de réserve.

On peut utiliser aussi des redresseurs de courant alternatif.

3. — Les accumulateurs sont très employés malgré leurs inconvénients.

Exercices.

1. **Une batterie** d'accumulateurs au plomb de 20 éléments est chargée à tension constante. Quelle doit être au minimum cette tension sachant qu'en fin de charge la tension aux bornes d'un élément est de 2,5 V? Quelle doit être exactement la tension du réseau et quelle résistance faut-il mettre en série pour que l'intensité au début de la charge (tension par élément, 1,8 V) soit de 150 A et à la fin de la charge 25 A?

On négligera la résistance de la batterie devant la résistance additionnelle.

2. Dans un réducteur de décharge, la résistance de protection et le balai auxiliaire sont toujours placés du côté du dernier élément de la batterie. Y aura-til inconvénient à les placer de l'autre côté?

3. Un camion électrique Sovel de 5 tonnes est équipé de deux moteurs en parallèle de chacun 6 *ch* et d'une batterie de 44 éléments au plomb de 560 *Ah*.

1° Quelle est la tension fournie par la batterie aux bornes des moteurs?

2° Quelle est l'intensité totale absorbée par les moteurs à pleine charge? (rendement des moteurs 90 %).

3° Pendant combien de temps le véhicule pourra-t-il rouler sans recharge de la batterie?

4. Un camion pesant 5 tonnes, tout compris, est mû par des accumulateurs pesant 1 350 *kg*. On consomme 80 watts-heures par tonne et par kilomètre et la courbe de décharge des accumulateurs en 8 heures montre que l'on peut fournir 37,5 watts-heures par kilogramme d'accumulateurs. Calculer :

1° le parcours total que peut faire le camion ;

2° sa vitesse moyenne.

5. Pendant la charge et pendant la décharge d'un accumulateur alcalin, la potasse est électrolysée et c'est à la suite de réactions secondaires que se produisent l'oxydation ou la réduction des oxydes de nickel et de fer. Expliquez ces réactions en utilisant vos connaissances sur l'électrolyse d'une solution de potasse, d'une part, et, d'autre part, la formule donnée au § 4 de la leçon précédente.

7. — GÉNÉRALISATION DE LA LOI D'OHM

30e LEÇON

Loi d'Ohm pour un circuit fermé.

1. Cas d'une portion de circuit ne renfermant que des récepteurs calorifiques.

Il s'agit, par exemple, d'une installation électrique ne comportant que des radiateurs électriques, des lampes à incandescence, c'est-à-dire des résistances mortes (fig. 1).

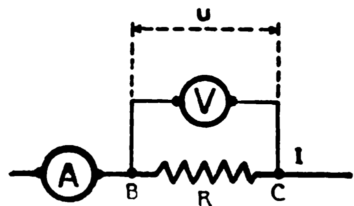


Fig. 1. — L'élément de circuit BC est composé d'une résistance pure U = RI

La résistance de cette portion de circuit est R *ohms*, on applique une tension U *volts* à ses bornes, l'intensité du courant dans le circuit est I *ampères*.

La puissance fournie au circuit est UI *watts*. La puissance dégagée sous forme de chaleur est RI^2 *watts*. Puisque toute l'énergie électrique est transformée en chaleur :

$$P = UI = RI^2$$

d'où

$$\boxed{U = RI} \qquad (1)$$

Nous avons établi cette formule dans la 10e Leçon. C'est l'expression, dans le cas le plus simple, de la loi d'Ohm.

Application. — Un fer à souder électrique consomme 300 watts sous 110 volts. L'intensité qu'il absorbe est :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{300}{110} = 2{,}73 \text{ A.}$$

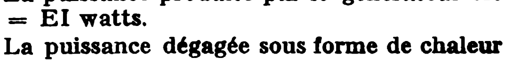
Sa résistance a pour valeur

$$R = U : I = \frac{110}{2{,}73} = 40\ \Omega.$$

2. Cas d'un circuit fermé comprenant un générateur et une résistance pure.

Il est très rare qu'une installation soit composée d'un générateur avec seulement des récepteurs thermiques. Supposons un circuit fermé (fig. 2) constitué par un générateur (dynamo), ayant une f. é. m. de E volts et une résistance intérieure r ohms débitant I ampères dans des lampes dont la résistance est R ohms.

a) La puissance engendrée par le générateur est égale à la puissance dépensée en chaleur dans les résistances du circuit (principe de la conservation de l'énergie).



La puissance produite par le générateur est $P = EI$ watts.

Fig. 2. — Le circuit fermé est composé d'un générateur et de résistances : $E = (r + R)\,I$

La puissance dégagée sous forme de chaleur est :

1° rI^2 watts dans le générateur,

2° RI^2 watts dans le circuit extérieur.

Donc :

$$EI = rI^2 + RI^2$$

et

$$\boxed{E = (r + R)\,I} \qquad (2)$$

b) En désignant par U la tension RI aux bornes du circuit extérieur (U est en même temps la tension aux bornes du générateur), la formule (2) s'écrit :

$$E = U + rI.$$

Donc :

1° la tension U aux bornes du générateur quand il débite un courant I est :

$$\boxed{U = E - rI}$$

elle est égale à la f. é. m. diminuée de la chute ohmique à l'intérieur du générateur;

2° quand le courant débité est nul, la f. é. m. et la tension aux bornes sont égales.

c) Nous avons établi expérimentalement la formule (2) au cours de la 22e Leçon.

Application. — *Une pile sèche de 3 éléments Leclanché dont la f. é. m. est 4,5 volts et la résistance intérieure 5 ohms débite 0,2 ampère dans l'ampoule d'une lampe de poche.*

Calculer la résistance x de la lampe,
la tension aux bornes de cette lampe,
la chute ohmique dans la pile et dans la lampe,

La résistance x de la lampe est telle que :

$$4{,}5 = (5 + x) \times 0{,}2$$

soit, en résolvant l'équation : $x = 17{,}5$ ohms.

La tension aux bornes de la lampe est :

$$U = RI = 17{,}5 \times 0{,}2 = 3{,}5 \text{ volts.}$$

La chute ohmique dans la pile a pour valeur :

$$rI = 5 \times 0{,}2 = 1 \text{ volt.}$$

3. Cas d'un circuit fermé comprenant un générateur, un récepteur électrolytique ou mécanique et une résistance en série.

Un tel circuit consiste, par exemple, soit en une pile alimentant un bac de nickelage ou d'argenture, soit en une dynamo chargeant une batterie d'accumulateurs, soit en une dynamo alimentant un moteur (fig. 3).

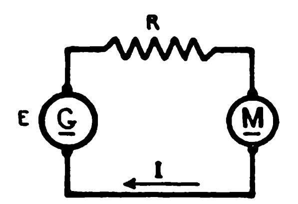


Fig. 3. — Le circuit fermé comprend un générateur, une résistance et un récepteur. $E = E' + RI$

Le générateur, dont la f. é. m. est E volts et qui débite I ampères, fournit une puissance EI watts.

La résistance intérieure r_1 du générateur, la résistance r de la ligne, la résistance intérieure r_2 du récepteur, sont en série et ont pour valeur totale $r_1 + r + r_2 = R$ ohms. Parcourues par le courant I, elles transforment en chaleur une puissance de RI^2 watts.

En outre, le récepteur absorbe et transforme en puissance chimique ou mécanique une puissance $E'I$ watts, E' étant la f. c. é. m. du récepteur.

D'après le principe de conservation de l'énergie :

$$EI = RI^2 + E'I,$$

d'où

$$\boxed{E = E' + RI} \qquad (3)$$

Application. — *Pour charger au régime de 10 ampères une batterie de 50 éléments d'accumulateurs avec une dynamo dont la f. é. m. est 135 volts, il faut placer dans le circuit une résistance R ohms. Calculer la valeur de cette résistance au début et à la fin de la charge.*

Au commencement de la charge, la f. c. é. m. de chaque élément est

1,9 volt, soit 1,9 × 50 = 95 volts pour la batterie entière. La résistance R doit satisfaire à la relation :

$$135 = 95 + 10\ R, \quad \text{soit } R = 4 \text{ ohms.}$$

A la fin de la charge, la f. c. é. m. de chaque élément devient 2,5 volts, soit 2,5 × 50 = 125 volts pour la batterie. La résistance R′ en série dans le circuit est :

$$135 = 125 + 10\ R' \quad \text{d'où} \quad R' = 1 \text{ ohm.}$$

R et R′ comprennent les résistances intérieures de la dynamo et de la batterie et la résistance de la ligne.

4. Cas général d'un circuit fermé constitué par plusieurs générateurs, des récepteurs possédant une f. c. é. m. et des résistances, le tout monté en série.

Un tel circuit comprendra par exemple (fig. 4) : une dynamo, un survolteur et deux batteries d'accumulateurs en cours de charge.

Les générateurs ont pour f. é. m. E_1 et E_2 et pour résistances intérieures r_1 et r_2.

Les récepteurs ont pour f. c. é. m. E'_1 et E'_2 et pour résistances intérieures r'_1 et r'_2.

La résistance des fils de connexion est R.

Soit I l'intensité du courant qui traverse tous les appareils en série.

Appliquons le principe de conservation de l'énergie à l'ensemble du circuit :

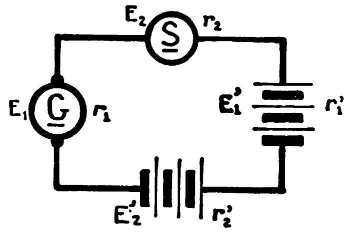


Fig. 4. — Le circuit comprend deux générateurs et deux récepteurs : $I = (\Sigma E - \Sigma E') : \Sigma R$

a) la puissance fournie par les générateurs est :

$$E_1 I + E_2 I = (E_1 + E_2)\ I;$$

b) la puissance (autre que calorifique) absorbée par les récepteurs est :

$$E'_1 I + E'_2 I = (E'_1 + E'_2)\ I;$$

c) dans les diverses résistances, la puissance dissipée en chaleur Joule a pour valeur :

$$r_1 I^2 + r_2 I^2 + r'_1 I^2 + r'_2 I^2 + R I^2 = (r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R)\ I^2.$$

Donc :

$$(E_1 + E_2)\ I = (E'_1 + E'_2)\ I + (r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R)\ I^2.$$

Nous tirons de cette égalité :

$$I = \frac{(E_1 + E_2) - (E'_1 + E'_2)}{r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R}$$

soit :

$$I = \frac{\text{somme des f. é. m.} - \text{somme des f. c. é. m.}}{\text{somme des résistances}}$$

ou, en employant une notation plus brève (le signe Σ se lit *somme*) :

$$\boxed{I = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma R}} \qquad (4)$$

Les formules (2) et (3) sont des simplifications de la formule (4) dans des cas particuliers.

Résumé.

1. — Dans une portion de circuit ne renfermant que des résistances mortes, la première loi d'Ohm s'écrit :

$$U = RI.$$

2. — Si le circuit est fermé et composé d'un générateur et d'une résistance, la formule devient :

$$E = (R + r)\,I.$$

3. — Dans le cas où il y a en circuit un récepteur à f. c. é. m. :

$$E = E' + RI.$$

4. — Dans le cas le plus général :

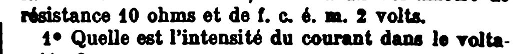
$$I = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma R}.$$

Exercices.

1. On a couplé en parallèle deux éléments d'accumulateurs au plomb ayant chacun une f. é. m. de 2 volts et une résistance intérieure de 0,01 ohm avec un élément cadmium-nickel de f. é. m. 1,1 volt et de résistance intérieure 0,01 ohm.

Calculer les courants de circulation dans chacun des appareils quand le circuit extérieur est coupé.

2. 5 éléments d'accumulateurs sont montés en série; la f. é. m. de chacun est 2 volts et la résistance intérieure négligeable. Cette batterie est reliée par des conducteurs dont la résistance totale est 0,5 ohm à un voltamètre de résistance 10 ohms et de f. c. é. m. 2 volts.

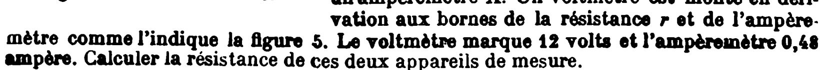


1° Quelle est l'intensité du courant dans le voltamètre?

2° Quelle résistance R faut-il placer en dérivation entre les bornes du voltamètre pour que le courant ne traverse plus le voltamètre?

Fig. 5. — Exercice n° 3.

3. Une pile de f. é. m. 15 volts et de résistance intérieure 4 ohms débite dans un circuit comprenant une résistance R de 2 ohms, une résistance *r* de 24 ohms et un ampèremètre A. Un voltmètre est monté en dérivation aux bornes de la résistance *r* et de l'ampèremètre comme l'indique la figure 5. Le voltmètre marque 12 volts et l'ampèremètre 0,48 ampère. Calculer la résistance de ces deux appareils de mesure.



(Concours de Vérificateur des installations électromécaniques.)

4. Aux extrémités d'un fil rectiligne de 1 *m* de long et de 50 Ω de résistance, on maintient une tension constante de 2 volts. On branche un voltmètre de 200 Ω de résistance entre une extrémité A du fil et un contact M qui se déplace sur le fil. Calculer en fonction de x = longueur AM l'indication V du voltmètre. Quel serait le résultat si le voltmètre avait une très grande résistance?

Construire la courbe représentative de V en fonction de x :

a) avec un voltmètre infiniment résistant;

b) avec le voltmètre de 200 Ω — dans ce cas on construira quelques points d'après les valeurs numériques calculées par la formule.

5. Une résistance inconnue R est mise en série avec un ampèremètre. Un voltmètre est relié aux deux extrémités de R par des fils de résistance négligeable. La résistance du voltmètre est 150 Ω. L'ampèremètre indique une intensité de 1,12 A, connue à un centième d'ampère près. Le voltmétre indique une différence de potentiel de 6,21 V connue à un centième de volt près.

Calculer la résistance R.

(*Bacc. Alger.*)

6. On réunit les deux pôles d'une pile par un fil de maillechort de 50 *m* de long et 1 *mm* de diamètre. Il passe dans le fil un courant de 86 *milliampères*.

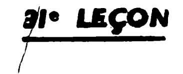
Si on diminue la longueur du fil de maillechort, le courant augmente. On trouve que pour doubler le courant, c'est-à-dire pour l'amener à 172 milliampères, il faut réduire la longueur du fil à 17,30 *m*.

On demande la résistance intérieure de la pile et sa force électromotrice, sachant que le maillechort est 13 fois plus résistant que le cuivre et qu'un fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre et de 100 *m* de long a une résistance de 2 ohms.

7. On couple en série plusieurs éléments de piles ou d'accumulateurs de résistances différentes. L'addition d'un nouvel élément peut-elle produire une diminution de l'intensité débitée? Exemple : 2 éléments d'accumulateurs au plomb de f. é. m. 2 *V* et de résistance intérieure 0,01 Ω débitent dans un circuit intérieur dont la résistance est 2,40 Ω. On ajoute en série aux accumulateurs un élément Leclanché dont la f. é. m. est 1,5 *V* et la résistance intérieure est 2 Ω. Pourquoi l'intensité du courant diminue-t-elle?

8. Démontrer que si plusieurs générateurs de même f. é. m., mais de résistances intérieures différentes sont montés en parallèle pour débiter dans une résistance extérieure, l'intensité fournie par chacun des générateurs est inversement proportionnelle à sa résistance intérieure.

(Concours pour l'emploi d'Inspecteur du Travail.)



Lois de Kirchhoff[1].

1. Utilité d'une généralisation algébrique des formules d'Ohm[2].

Dans le cas d'installations électriques comme celles dont il a été question dans la leçon précédente, on sait à priori quel est le sens du courant, quels appareils sont générateurs, lesquels sont récepteurs. Les formules d'Ohm s'appliquent sans difficulté.

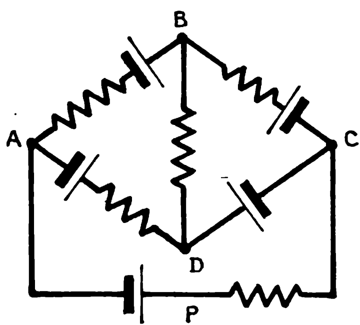


Fig. 1. — **Ce montage représente un *réseau* :**
les points A, B, C, D sont des *nœuds* ;
le circuit fermé ABCDA est une *maille* ;
un élément tel que AB est une *branche*.

Mais il est des montages plus complexes constitués par divers conducteurs, générateurs, récepteurs, connectés entre eux de façon quelconque. La figure 1 représente un tel ensemble auquel on donne le nom de ***réseau.*** Un point de bifurcation tel que A se nomme un ***nœud;*** un parcours fermé, par exemple BCDAB, s'appelle une ***maille;*** un élément de circuit, tel que AB, compris entre deux nœuds, est une ***branche.***

A l'examen du schéma, il est impossible de reconnaître quel est le sens du courant dans telle branche, et par conséquent de savoir si les appareils placés dans cette branche, quand ils ne sont pas seulement thermiques, fonctionnent comme générateurs ou comme récepteurs.

Nous nous proposons le problème suivant :

Connaissant les résistances et les f. é. m. en grandeur et en sens dans toutes les branches d'un réseau, déterminer :

1° les intensités;

2° le sens du courant dans chaque branche;

1. *Kirchhoff* (1824-1887), savant mathématicien et physicien allemand.

2. La connaissance des lois de Kirchhoff n'est pas indispensable pour traiter les problèmes pratiques d'électricité industrielle. Mais elle peut être utile à certains lecteurs, par exemple aux candidats aux Concours des P.T.T.

3° le fonctionnement des f. é. m., qui sont, soit génératrices, soit réceptrices (ce sont alors des f. c. é. m.), suivant le sens réel du courant dans la branche où elles sont placées.

2. Convention de signes.

Choisissons dans chaque branche un sens positif de circulation des courants que nous indiquons par une flèche (fig. 2); *ce choix est tout à fait arbitraire.*

En général, rien ne permet de prévoir si le courant dans une branche passe effectivement dans le sens choisi. Mais, quand nous aurons calculé les intensités des courants, les résultats obtenus seront des nombres algébriques; le signe de chaque intensité nous indiquera le sens réel du courant correspondant : si l'intensité est positive, le courant passe dans le sens de la flèche arbitrairement tracée; si l'intensité est négative, le courant passe en sens contraire.

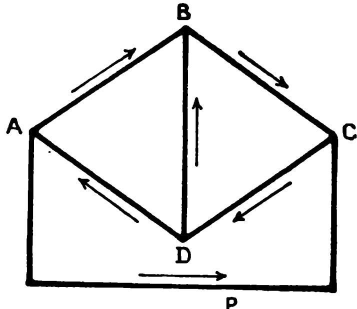


Fig. 2. — Sur chaque branche du réseau nous fixons *arbitrairement* un sens positif; il est indiqué par une flèche.

3. Règle des nœuds.

Soit le nœud A (fig. 3).

Les courants i_4 et i_5 qui se dirigent vers A y apportent chaque seconde $i_4 + i_5$ coulombs.

Les courants i_1 et I qui partent de ce nœud emportent chaque seconde $i_1 + I$ coulombs.

Or l'état électrique du point A est invariable : il en part donc autant de coulombs qu'il en arrive Par conséquent :

$$i_4 + i_5 = i_1 + I.$$

Généralisons : ***la somme des intensités des courants qui se dirigent vers un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui s'en éloignent.***

Cette règle est la première loi de Kirchhoff.

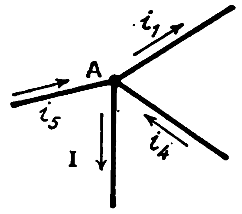


Fig. 3. — **Règle des nœuds.** Ici, pour le nœud A : $i_4 + i_5 = I + i_1$.

4. Règle des mailles.

Rappelons d'abord que la différence de potentiel RI entre les extrémités d'une résistance R parcourue par un courant I est une baisse de tension si l'on suit le conducteur en descendant le courant, une augmentation de tension en remontant le courant.

Parcourons complètement une maille *dans un sens quelconque* par

exemple la maille de la figure 4 à partir du point A dans le sens ADCPA, en déterminant les variations de potentiel le long du circuit.

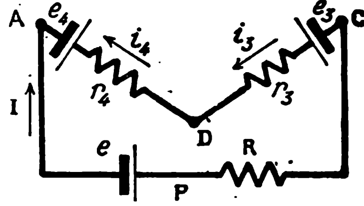


Fig. 4. — Règle des mailles : $\Sigma e = \Sigma ri$.

Ici, pour le parcours APCDA : $e + e_3 - e_4 = -RI + r_3 i_3 + r_4 i_4$.

En suivant la branche AD, nous rencontrons d'abord la f. é. m. e_4 dont la polarité est indiquée par le mode de représentation d'une f. é. m. : le potentiel croît de e_4. En outre, nous remontons le courant : la tension augmente de $r_4 i_4$. Donc :

$$U_D - A_A = e_4 + r_4 i_4. \quad (1)$$

Dans la branche DC, nous remontons d'abord le courant, puis rencontrons la f. é. m. e_3 qui diminue le potentiel :

$$U_C - U_D = r_3 i_3 - e_3. \quad (2)$$

Dans la branche CPA

$$U_A - U_C = -RI - e. \quad (3)$$

En ajoutant les relations (1), (2) et (3) membre à membre :

$$O = e_4 - e_3 - e + r_4 i_4 + r_3 i_3 - RI.$$

Soit :

$$e_4 - e_3 - e = -r_4 i_4 - r_3 i_3 + RI. \quad (4)$$

Pour une maille d'un réseau, la somme algébrique des f. é. m. est égale à la somme algébrique des produits des intensités par les résistances à condition:

1° de considérer les f. é. m. comme positives quand, en parcourant la maille, on les rencontre dans le sens où elles accroissent le potentiel, comme négatives dans le cas contraire;

2° de prendre positivement les intensités quand on descend le courant, négativement quand on le remonte.

La formule $\Sigma e = \Sigma ri$, traduit la seconde loi de Kirchhoff.

A titre de vérification, **parcourons** la maille dans le sens APCDA nous obtenons :

$$e + e_3 - e_4 = -RI + r_3 i_3 + r_4 i_4$$

c'est l'expression (4) dont tous les termes ont changé de signe : le sens de parcours de la maille est donc indifférent.

5. Emploi des lois de Kirchhoff.

Le réseau représenté par la figure 5 est fait de 6 branches donc 6 intensités sont à calculer.

En appliquant la règle des nœuds à chacun des **quatre** points de bifurcation, A, B, C, D, on obtient 4 équations.

Le réseau comprend 7 mailles, savoir :

APCDA,	ABDA,	ABCDA,	APCBDA,
APCBA,	DBCD,	APCDBA,	

qui fournissent 7 équations par application de la règle des mailles.

On dispose donc, au total, de 11 équations pour calculer 6 inconnues. Il y en a 5 qui sont inutiles, parce qu'elles ne sont pas indépendantes des autres. On choisit les 6 équations qui paraissent les plus commodes à résoudre. Les calculs ne sont pas difficiles, mais souvent longs et fastidieux.

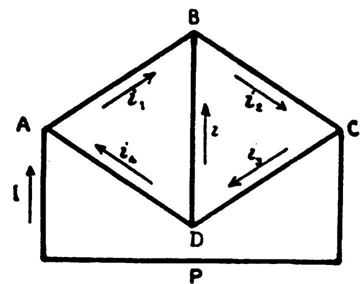


Fig. 5. — Ce réseau est fait de six branches, il possède quatre nœuds et sept mailles.

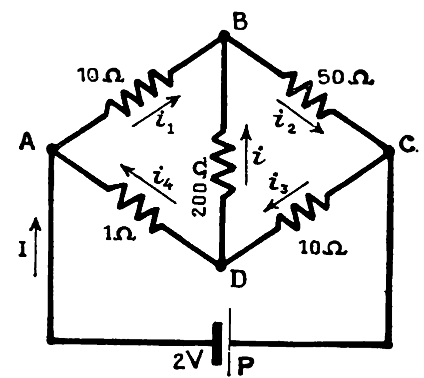


Fig. 6. — Schéma d'un montage en pont de Wheatstone.

Les valeurs trouvées pour les racines sont positives ou négatives. Les courants d'intensité positive circulent effectivement dans le sens choisi au début comme positif. Les courants d'intensité négative passent en sens inverse du sens choisi.

Application numérique. — La figure 6 représente un réseau connu sous le nom de pont de Wheatstone non équilibré. Nous nous proposons de calculer seulement le courant i.

Les flèches tracées sur la figure indiquent les sens positifs des courants.

Les règles de Kirchhoff fournissent le système suivant :

Nœud A	$I + i_4 - i_1$	$= 0$	(1)
— C	$i_2 - I - i_3$	$= 0$	(2)
— D	$i_3 - i_4 - i$	$= 0$	(3)
Maille ABDA	$10i_1 - 200i + i_4$	$= 0$	(4)
— BCDB	$50i_2 + 10i_3 + 200i$	$= 0$	(5)
— APCBA	$2 + 50i_2 + 10i_1$	$= 0$	(6)

Puisque nous ne cherchons que la valeur de i, éliminons successivement les autres inconnues; d'abord i_4 en nous servant de sa valeur dans l'équation (3), puis I en additionnant (1) et (2).

Il reste finalement le système de 4 équations à 4 inconnues :

$$\begin{cases} i_2 - i_1 - i = 0 & (7) \\ 10i_1 - 20i + i_3 = 0 & (8) \\ 20i + 5i_2 + i_3 = 0 & (9) \\ 2 + 10i_1 + 50i_2 = 0 & (10) \end{cases}$$

Retranchons membre à membre les équations (8) et (9) pour éliminer i_3 :

$$\begin{cases} i_2 - i_1 - i = 0 \\ 10i_1 - 221i - 5i_2 = 0 \\ 2 + 10i_1 + 50i_2 = 0 \end{cases}$$

puis, en éliminant i_1 et i_2 :

$$i = -\ 0{,}000\ 724 \textit{ ampère.}$$

Le courant i, dans la branche BD, va de B vers D, en sens inverse de la flèche, et son intensité est 0,000 724 *ampère.*

Résumé.

Dans un réseau, après avoir choisi un sens positif sur chaque branche, on écrit :
***a)* à chaque nœud $\Sigma\, i = 0$;**
***b)* pour chaque maille $\Sigma\, e - \Sigma R\, i = 0$**
et l'on obtient un système d'équations du premier degré qui permet de calculer les intensités des courants dans toutes les branches.

Exercices.

1. Compléter la résolution du système d'équations du paragraphe 5 de la leçon

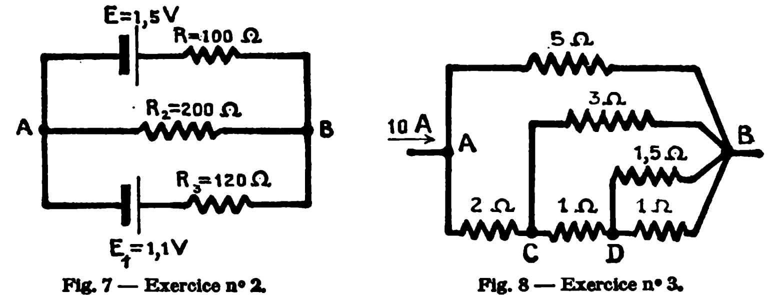


Fig. 7 — Exercice n° 2.

Fig. 8 — Exercice n° 3.

et calculer les intensités des courants dans toutes les branches du réseau.

2. Deux éléments de pile E et E_1 sont montés en opposition comme l'indique la figure 7. Calculer les intensités dans les trois branches du circuit.

3. Un courant de 10 ampères se bifurque au point A et se partage dans les diverses résistances de la figure 3.

Chercher l'intensité dans chacune des branches du réseau.

4. A) Une pile impolarisable de résistance intérieure négligeable et de force électromotrice E alimente, par l'intermédiaire d'une résistance R, deux galvanomètres G et G' de résistance intérieure g et g', disposés en parallèle.

Calculer le courant débité par la pile, les courants débités dans chacun des galvanomètres, ainsi que la différence de potentiel commune entre leurs bornes.

B) On place en série avec le galvanomètre G une pile impolarisable de force électromotrice E' et de résistance intérieure négligeable.

Dans chacun des cas suivants :

1° le courant dans le galvanomètre G est nul;

2° le courant dans le galvanomètre G' est nul;

3° le courant débité par la pile E est nul;

calculer la grandeur et le sens de la f. é. m. E',

la d. d. p. aux bornes de chaque galvanomètre.

le courant débité par la pile E.

Application numérique $E = 2$ volts

$R = 100$ ohms

$g = 200$ —

$g' = 50$ —

(Concours d'entrée à l'Ecole d'électricité industrielle de Paris.)

5. Une batterie de piles P_1 comprend 15 éléments ayant chacun une f. é. m. de 1,4 volt et une résistance intérieure de 1 Ω. On la monte en parallèle avec une batterie P_2 identique à P_1. L'ensemble débite dans un circuit comprenant une résistance AB de 150 Ω en série avec trois résistances CD en parallèle valant respectivement 376 Ω, 376 Ω et 564 Ω.

1° Quelle est l'intensité du courant dans chaque élément de pile?

2° Quelle est l'intensité du courant dans chacune des résistances extérieures?

3° Quelle est la chute de tension dans la batterie P_1?

4° Que devient cette chute si on shunte AB par une résistance de 100 Ω?

(Concours pour l'emploi d'agent des installations extérieures des P. T. T.)

6. Dans le rhéostat monté en potentiomètre dont le schéma est donné par la figure 7 de la page 77, la résistance AB est 30 Ω. Entre les points A et B existe une d. d. p. constante de 115 *V*. L'appareil électrique en dérivation entre les points A et C a une résistance de 3 Ω. Il est traversé par un courant de 1 ampère.

On demande :

1° le courant I dans la partie BC du potentiomètre ;

2° le courant i dans la partie AC;

3° la résistance de AC;

4° le courant dans l'appareil en dérivation quand la résistance AC est 6 Ω.

Exercices de révision.

1. On recueille dans un même flacon l'hydrogène et l'oxygène produits par électrolyse d'eau acidulée.

De quelle intensité faut-il disposer pour obtenir en un quart d'heure un litre du mélange des deux gaz?

2. Un courant constant traverse un ampèremètre et une cuve à sulfate de cuivre L'ampèremètre indique 3,2 A. Au bout d'une heure, l'augmentation de poids de la cathode est 3,5 *g*. L'indication de l'ampèremètre est-elle exacte? Quelle correction faut-il lui faire subir?

Le cuivre est bivalent et son poids atomique est 63.

3. Un courant de 0,5 A traverse une cuve électrolytique à eau acidulée et un voltamètre à nitrate d'argent.

1° Quel est le volume total des gaz dégagés dans la cuve au bout d'une heure?

2° Pendant combien de temps faut-il faire passer le courant pour obtenir un dépôt de 3,24 *g* à la cathode du voltamètre? A*g* = 108.

4. On veut recouvrir une lame métallique dont la surface est 100 cm^2 d'une couche d'argent de 0,1 *mm* d'épaisseur. Quelle sera la durée de l'opération en employant ne courant de 2 ampères? La densité de l'argent est 10,5 g/cm^3.

5. L'ohm étalon est la résistance offerte à un courant invariable par une colonne du mercure pur à 0°, ayant une masse de 14,452 1 *g*, une longueur de 106,3 *cm* et une section constante. Calculer la résistivité du mercure à 0°. La densité du mercure à 0° est 13,6 g/cm^3.

6. Calculer la résistance d'un mètre d'un rail d'acier pesant 48 *kg* au mètre. La densité de l'acier est 7,80 g/cm^3 et sa résistivité 20 microhms-centimètres.

7. Un courant de 5 ampères passe pendant 10 minutes dans une résistance de 4,18 ohms plongée dans un litre d'eau dont la température initiale était 15°.

1° Quelle est, en watts, la puissance dépensée dans le circuit?

2° Quelle est l'énergie en joules apportée à l'eau?

3° Quelle est la température finale de l'eau?

8. Entre deux points A et B existe une différence de potentiel de 110 volts. Ces points sont reliés par deux fils AL, BL aux bornes d'une lampe à incandescence L. La résistance de chacun de ces fils est de 10 ohms.

1° Sachant que l'intensité qui parcourt ce circuit est 0,6 ampère, on demande la résistance de la lampe.

2° Quelle est la différence de potentiel entre les bornes de la lampe?

3° Quelle est la puissance consommée par la lampe? On exprimera cette puissance en watts et en calories par seconde.

9. Un fer à repasser électrique consomme une puissance de 300 watts lorsqu'il est parcouru par un courant de 2,7 ampères. Calculer la résistance électrique de l'appareil et le prix de l'énergie électrique consommée en une heure de repassage sachant que l'énergie électrique est payée 18,70 *fr* le kilowatt-heure.

10. On désire qu'un litre d'eau soit porté à 100° en 20 minutes dans une étuve électrique.

Chercher :

1° la quantité de chaleur théoriquement nécessaire quand la température de l'eau froide est 12°;

2° la puissance en watts absorbée par l'étuve;

3° l'intensité du courant quand la tension aux bornes est 110 volts;

4° la résistance du fil chauffant de l'étuve.

11. Une pile dont la f. é. m. est 5 volts et la résistance intérieure 3 ohms débite sur un circuit formé par une résistance R montée en série avec un voltmètre V dont la résistance est 300 ohms. On constate que le voltmètre indique 3 volts. Calculer la valeur de la résistance R ainsi que la puissance, exprimée en calories par seconde, que cette résistance absorbe par effet Joule.

12. Une pile dont la f. é. m. est 10 volts et la résistance intérieure 5 ohms débite dans une résistance AB de 2 ohms.

Pour régler à 1 ampère l'intensité dans la résistance AB, on branche entre A et B une résistance X ohms.

Calculer la valeur de X.

13. Six éléments Daniell sont connectés par trois en série et les deux groupes sont montés en parallèle. La résistance intérieure de chaque élément est 0,5 Ω. L'ensemble débite sur une résistance extérieure de 1 Ω. On demande :

1° l'intensité du courant obtenu;

2° la quantité de zinc consommé par la pile en une heure;

3° la quantité de sulfate de cuivre consommée pendant le même temps.

14. Une pile a une f. é. m. de 2,2 volts. On la fait débiter dans une résistance de 0,6 ohm. La différence de potentiel aux bornes de la pile est alors 1,2 volt.

On demande :

1° la résistance intérieure de la pile;

2° l'énergie dépensée dans le circuit extérieur pendant 10 minutes.

15. Soit deux fils conducteurs de même métal, ayant l'un 1 *mm* et l'autre 0,1 *mm* de diamètre. Si l'on réunit les deux pôles d'une pile par un tronçon de 100 *m* du premier fil, la tension aux bornes de la pile tombe à la moitié de la valeur qu'elle a à circuit ouvert.

On demande :

1° Quelle longueur du second fil il faut employer pour obtenir le même résultat?

2° Quel serait le résultat obtenu si l'on réunissait aux deux pôles de la pile à la fois les deux tronçons de fil en question?

3° Quelle est la résistance de la pile sachant que le premier fil a une résistance de 20 omhs au kilomètre?

16. Quatre sonneries électriques, chacune de résistance 5 Ω, sont placées à l'extrémité d'une ligne dont la résistance est 8 Ω. Cette ligne est alimentée par une pile de f. é. m. 6,5 V et de résistance intérieure 1 Ω. Comment devra-t-on monter les sonneries pour que chacune absorbe la plus grande intensité possible?

17. Une pile, dont la f. é. m. est 1,5 V et la résistance intérieure 0,5 ohm, est reliée par deux conducteurs AB et CD de chacun 1 Ω de résistance à une combinaison de deux conducteurs mis en parallèle BMD et BND ayant des résistances respectivement égales à 3 Ω et 2 Ω.

On demande de calculer :

1° la résistance entre B et D;

2° l'intensité du courant fourni par la pile;

3° l'intensité du courant dans chacune des branches BMD et DNB;

4° la différence de potentiel aux bornes A et C de la pile.

18. Une batterie d'accumulateurs de 48 volts et de résistance intérieure négligeable débite sur deux résistances en parallèle l'une de 24 ohms, l'autre de 12 ohms. Quelle est l'intensité dans chacune de ces résistances? Que devient-elle si l'on shunte cesrésistances par une troisième résistance de 96 ohms?

Quelle est l'intensité dans cette dernière résistance?

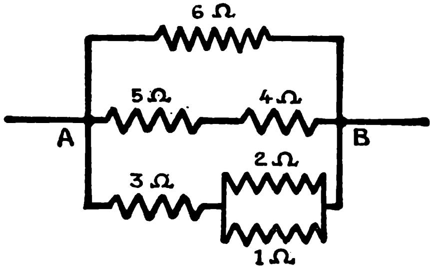


Fig. 1. — Problème 19.

19. Calculer la résistance équivalente à l'ensemble des résistances représenté par la figure 1.

20. Un courant de 12 ampères se bifurque au point A suivant trois branches qui se réunissent d'autre part au point B.

Les résistances des trois branches sont $r_1 = 2\ \Omega, r_2 = 3\ \Omega, r_3 = 4\ \Omega$. Chercher :

1° la d. d. p. U entre A et B;

2° l'intensité dans les trois branches;

3° la résistance équivalente à l'ensemble des trois branches en parallèle.

21. On se propose d'installer une batterie d'accumulateurs au plomb capable d'alimenter chaque soir, pendant 4 heures, 20 lampes de 60 watts, 110 volts.

Calculer le nombre d'éléments nécessaires au début et à la fin de la décharge.

Déterminer l'intensité que doit fournir la batterie.

Quelle doit être la capacité de chaque élément?

22. On charge un élément d'accumulateur, dont les lames de plomb pèsent 10 *kg*, à raison de 0,5 *A* par kilogramme de plomb. La charge dure 12 heures. La d. d. p. entre les pôles de l'accumulateur est 2,2 V pendant toute la charge. On demande :

1° la quantité d'électricité fournie à l'accumulateur;

2° l'énergie dépensée à la charge.

On décharge ensuite cet accumulateur. Cette décharge s'effectue en 10 heures avec une intensité de 5 A, sous une tension de 1,8 V. On demande :

1° la capacité de l'accumulateur;

2° l'énergie restituée pendant la décharge;

3° le rendement de l'accumulateur en quantité et en énergie.

23. Une batterie d'accumulateurs de résistance intérieure négligeable et dont la *fcm* est égale à 10 volts, est mise en série avec une résistance fixe R et une résistance variable r constituée par un fil de maillechort de 1/2 mm² de section.

1. Pour quelle valeur de r la différence de potentiel entre les extrémités A et B de la résistance fixe R est-elle égale à 8 volts, l'intensité du courant étant égale à 2/10 ampère?

2. Quelle est alors la longueur du fil de maillechort? La résistance d'un fil de maillechort de 1 mm² de section et de 10 mètres de longueur est égale à 2 ohms.

3. Quelle sera la quantité de chaleur dégagée en 10 minutes dans le fil de maillechort?

4. On place en dérivation sur la résistance variable une résistance de 20 ohms. Quelle longueur faudra-t-il donner au fil de maillechort pour ramener à 8 volts la différence de potentiel entre A et B?

Équivalent mécanique de la calorie : J = 4,18 joules.

(*Concours des Contrôleurs des installations électro-mécaniques*, 1955.)

2e PARTIE

EFFETS MAGNÉTIQUES DU COURANT CONTINU.

8. — CHAMP ET INDUCTION MAGNÉTIQUES

32e *LEÇON*

Aimants et bobines.

1. Les aimants usuels ont deux pôles.

Les ***aimants*** sont des solides qui ont la *propriété d'attirer la limaille de fer.* Celle-ci se fixe sur certaines régions appelées ***pôles*** (fig. 1).

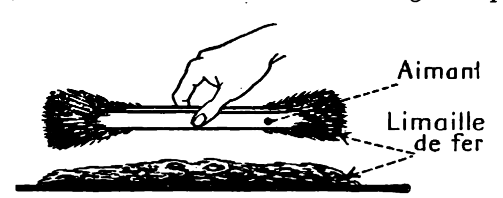


Fig. 1. — La limaille de fer se fixe à chaque extrémité de l'aimant.

Il existe des *aimants naturels*, formés par certains oxydes de fer comme la magnétite Fe_3O_4.

Mais les aimants utilisés couramment sont des morceaux d'acier aimantés à l'aide d'un courant électrique, ce sont des *aimants artificiels.*

On leur donne des formes appropriés aux usages auxquels on les destine ; on a ainsi des aimants droits, en U, des aiguilles aimantées, ... (fig. 2).

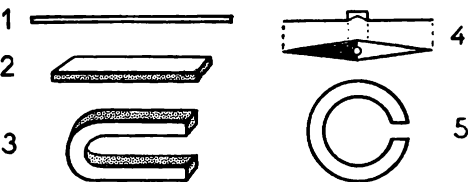


Fig. 2. — Diverses formes d'aimants.
1, aimant long et fin ; 2, barreau droit ; 3, aimant en U ; 4, aiguille de boussole ; 5, aimant circulaire.

Le ***magnétisme*** est l'ensemble des propriétés des aimants.

2. Les deux pôles d'un aimant sont différents.

Expérience. — Rendons mobile un barreau aimanté, soit en le plaçant sur un bouchon plat flottant sur de l'eau, soit en le suspendant par un fil fin sans réaction de torsion. Il s'oriente toujours dans la même direction, à peu près la direction nord-sud (fig. 3).

C'est toujours le même pôle qui se dirige vers le nord; on l'appelle ***pôle nord***, l'autre est le ***pôle sud***. Les deux pôles, quoique attirant également la limaille, sont différents.

Une aiguille aimantée montée sur un pivot vertical constitue l'appareil bien connu, nommé *boussole*, utilisé pour repérer la direction du Nord. Pour distinguer le pôle nord on le colore en bleu par oxydation.

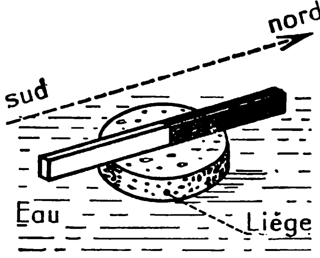


Fig. 3. — Un aimant mobile s'oriente à peu près dans la direction sud-nord

3. Des actions mécaniques s'exercent entre pôles d'aimant.

Expérience. — Approchons de l'aiguille d'une boussole un barreau aimanté. Nous constatons qu'un pôle nord attire un pôle sud et repousse un pôle nord (fig. 4). Il en est toujours ainsi :

Deux pôles d'aimants de même nom se repoussent, deux pôles de noms contraires s'attirent.

Les forces qui s'exercent entre pôles d'aimants sont dites *forces magnétiques.*

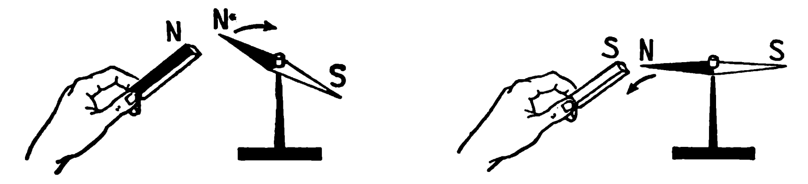


Fig. 4. — **Les pôles de même nom se repoussent,** les pôles de noms contraires s'attirent.

Nous allons étudier dans la suite de ce cours des forces dues à des causes diverses. Pour indiquer leur origine, on fait souvent suivre le mot force d'un adjectif qualificatif indiquant cette origine.

Exemples : forces magnétiques, forces électromagnétiques.

Toutes ces forces, quelle que soit leur origine, ont les mêmes propriétés mécaniques : elles peuvent se mesurer en *kilogrammes-force*, en *newtons.*

4. Une bobine parcourue par un courant est comparable à un aimant.

Une bobine longue ou solénoïde s'obtient en enroulant en hélice un fil conducteur sur un cylindre isolant. Elle peut comporter plusieurs couches superposées, toutes avec le même sens d'enroulement.

Quand un courant circule dans le fil, la bobine a des propriétés magnétiques.

a. *Ses extrémités agissent sur l'aiguille aimantée.*

Expériences. — Approchons l'extrémité A de la bobine d'une aiguille aimantée, elle attire le pôle nord et repousse le pôle sud (fig. 5).

Recommençons avec l'extrémité B; B attire le pôle sud.

La bobine se comporte comme un aimant dont les pôles seraient confondus avec ses extrémités : A est le pôle sud, B le pôle nord.

Fig. 5. — **Une bobine parcourue par un courant possède un pôle sud et un pôle nord comme un aimant.**

Inversons le courant dans la bobine. L'extrémité A attire le pôle sud de l'aiguille, A est devenue un pôle nord ou face nord; nous vérifions facilement que B est alors un pôle sud.

Les pôles d'une bobine s'échangent quand on inverse le sens du courant.

b. *Rendue mobile, elle s'oriente comme un aimant.*

La bobine est suspendue par un long fil sans torsion pour tourner facilement autour d'un axe vertical. Ses deux extrémités, rapprochées de l'axe de rotation, plongent dans deux godets de mercure réunis à la source de courant (fig. 6).

Envoyons un courant dans le fil : la bobine s'oriente dans la direction nord-sud.

Inversons le courant : le solénoïde se retourne bout pour bout.

La bobine se comporte comme une aiguille aimantée.

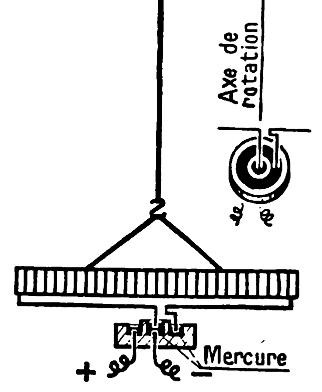


Fig. 6. — **La bobine mobile peut tourner autour d'un axe vertical sans cesser de recevoir du courant. Elle s'oriente dans la direction nord-sud.**

c. *Une bobine subit de la part d'un barreau aimanté ou d'une autre bobine les mêmes actions mécaniques qu'un aimant.*

Reprenons notre bobine mobile. Approchons de son pôle nord, le pôle nord d'un aimant droit (fig. 7) : nous constatons une répulsion. Approchons le pôle sud du barreau : il y a attraction.

L'expérience réussit en remplaçant l'aimant droit par une deuxième bobine tenue à la main (fig. 8).

En résumé :

Aussi bien pour les actions exercées que pour les actions subies, une bobine parcourue par un courant est équivalente à un aimant.

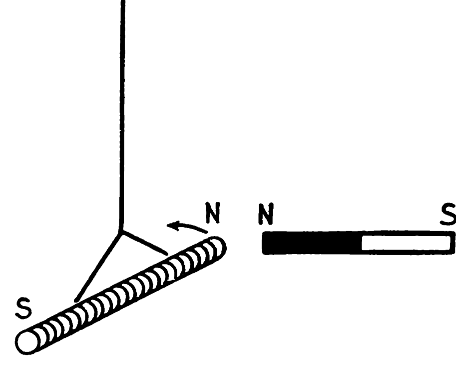


Fig. 7. — **Attraction ou répulsion** entre les pôles d'une bobine et ceux d'un aimant.

5. Détermination des pôles d'une bobine.

La polarité des extrémités d'une bobine dépend du sens du courant.

La règle suivante fournit un moyen commode de connaître la nature des pôles sans recourir à une aiguille aimantée.

Le pôle ou face sud d'une bobine est l'extrémité devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre; dans le cas contraire on se trouve devant un pôle nord.

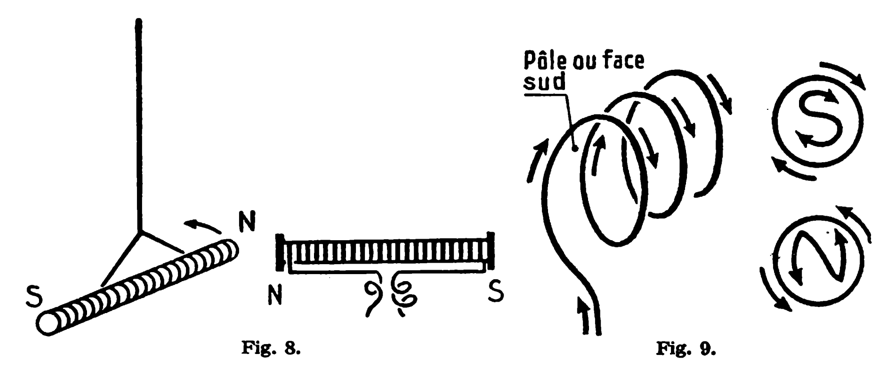


Fig. 8. — Attraction ou répulsion entre les pôles de deux bobines.

Fig. 9. — Pour trouver la polarité d'une bobine, on écrit la lettre N ou S sur la face, devant laquelle on se trouve en plaçant des flèches aux extrémités de la lettre. La lettre pour laquelle les flèches sont dans le sens du courant indique la polarité.

Remarquons en outre, que devant un pôle sud on voit le courant tourner dans le sens de la lettre *S*, devant un pôle nord dans le sens de la lettre *N* (fig. 9).

6. Constitution d'un barreau aimanté.

Expérience. — Prenons un aimant formé d'une longue aiguille d'acier trempé; plongé dans la limaille il ne l'attire que près de ses deux extrémités, il a donc deux pôles bien distincts.

Cherchons à isoler chaque pôle en coupant l'aiguille en deux morceaux; nous obtenons deux aimants.

Repérons leurs pôles : de chaque côté de la coupure sont apparus deux pôles de noms contraires (fig. 10).

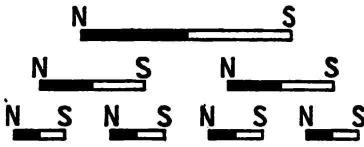


Fig. 10. — Il est impossible d'obtenir un aimant à un seul pôle.

On peut continuer le fractionnement, chaque fragment est un aimant avec deux pôles. *Il est impossible d'isoler un pôle d'aimant.*

Reconstituons l'aimant, en rapprochant les extrémités qui ont été séparées (fig. 11).

Avec une boussole, nous constatons qu'il n'y a plus que deux pôles extrêmes, les pôles de noms contraires placés l'un contre l'autre se neutralisent.

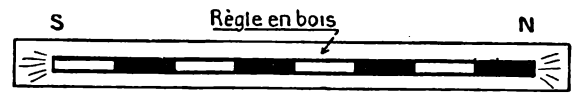
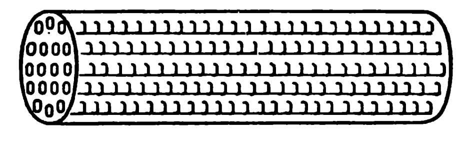
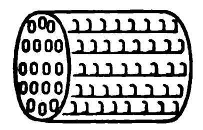


Fig. 11. — Reconstitution sur une planchette d'un aimant brisé.

Ces expériences et l'identité des propriétés magnétiques des aimants et des courants ont suggéré à ***Ampère*** que les propriétés des aimants pouvaient être dues à la présence dans la matière de très petits courants circulaires formant des solénoïdes juxtaposés. Ampère appelait ces courants, des ***courants particulaires*** ils existent au sein même des atomes.





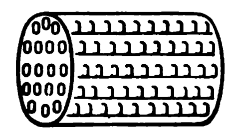


Fig. 12.
Le barreau aimanté comporte un nombre prodigieux de courants particulaires alignés. Il en est de même des deux tronçons.

Si la physique moderne a dû renoncer à la trop grande simplicité de l'hypothèse d'Ampère, les explications qu'elle donne de l'aimantation de la matière n'en procèdent pas moins de la même idée. Nous raisonnerons par la suite comme si ces courants particulaires existaient réellement.

Résumé.

1. — Un aimant est un barreau d'acier dont les extrémités attirent la limaille de fer.

2. — Les régions où s'attache la limaille sont les pôles : un aimant possède deux pôles.
Ces pôles ont des propriétés différentes : un aimant mobile s'oriente dans la direction nord-sud, ce qui distingue le pôle nord et le pôle sud de l'aimant.

3. — Les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.

4. — Une bobine parcourue par un courant se comporte à tous égards comme un barreau aimanté.

5. — Il est impossible d'obtenir un aimant n'ayant qu'un seul pôle.
Un aimant doit ses propriétés à l'existence de courants à l'intérieur des atomes.

Champ magnétique. Induction magnétique.

1. Les phénomènes entre les branches d'un aimant en U.

Expériences. — 1° Le conducteur MP pend en escarpolette entre les branches d'un aimant en U. Il se déplace lorsqu'on y envoie un courant (fig. 1).

Entre les branches de l'aimant, *un fil parcouru par un courant électrique est soumis à des forces.*

2° Lorsqu'on déplace à la main le fil MP, un galvanomètre très

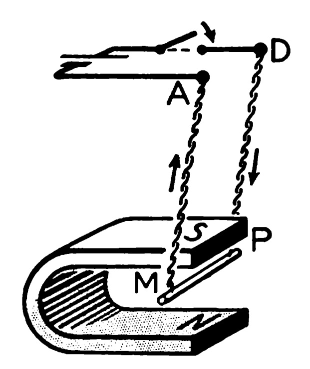


Fig. 1. — Lorsqu'on ferme l'interrupteur, MP se déplace vers la gauche. Il est soumis à une force.

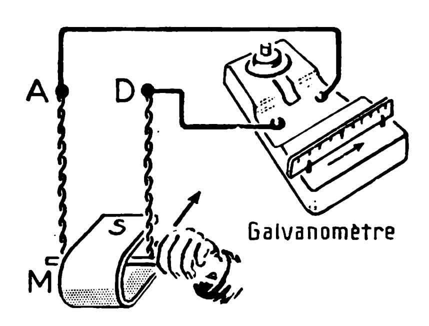


Fig. 2. — On déplace MP entre les branches de l'aimant, le galvanomètre dévie. MP est le siège d'une force électromotrice.

sensible connecté en A et D dévie (fig. 2) montrant ainsi la production d'un courant : MP est donc le siège d'une force électromotrice.

Entre les branches de l'aimant, *un conducteur en mouvement est le siège d'une force électromotrice.*

3° Une petite aiguille aimantée, placée entre les branches de l'aimant, s'y oriente (fig. 3), montrant ainsi l'existence de forces sur la matière aimantée.

Cette expérience confirme l'hypothèse des courants particulaires d'Ampère. L'orientation de l'aiguille aimantée est due aux forces qui s'exercent sur les courants particulaires, comme le mouvement de l'escarpolette de la 1re expérience est dû aux forces qui s'exercent sur le courant passant dans MP.

4° Un clou, placé entre les branches de l'aimant, attire la limaille de fer ou un autre clou, il s'est aimanté (fig. 4).

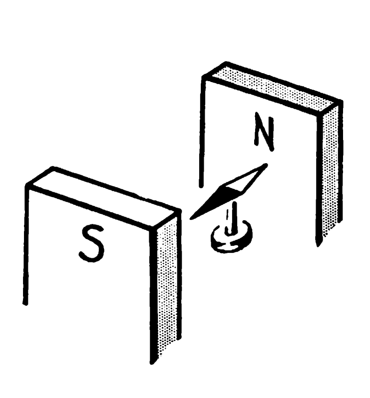


Fig. 3. — Placée entre les branches de l'aimant, l'aiguille aimantée s'oriente perpendiculairement aux pôles.

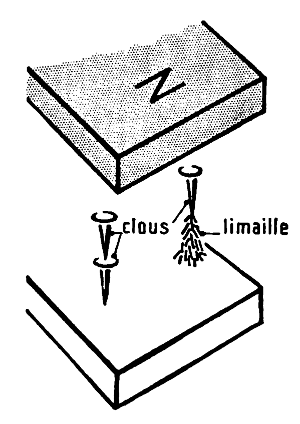


Fig. 4. — Les clous en fer s'aimantent lorsqu'ils sont dans un champ magnétique. Le fer est magnétique.

Toute substance qui s'aimante ainsi, comme le fer, est dite *ferromagnétique* ou plus simplement *magnétique.*

Ces phénomènes nous montrent que l'*espace entre les branches de l'aimant jouit de propriétés particulières*, on dit qu'il y règne un ***champ magnétique.***

2. Les aimants, les bobines, les électro-aimants sont les sources de champ magnétique.

Nous constatons les mêmes phénomènes autour d'une bobine parcourue par un courant; ils sont encore plus intenses au voisinage d'une bobine qui comporte un noyau de fer (électro-aimant).

Une bobine ou un électro-aimant produisent donc un *champ magnétique* dans l'espace qui les environne; on dit que la bobine ou l'électro-aimant est la *source de ce champ.*

Les sources de champ magnétique sont finalement toujours des courants électriques : courants passant dans les conducteurs (cas de la bobine) ou courants particulaires dans la matière aimantée.

Le champ de l'électro-aimant prend ses sources d'une part dans les courants qui parcourent l'enroulement et d'autre part dans les courants particulaires du fer.

3. L'induction magnétique précise l'état magnétique en un point d'un champ magnétique.

Un fil parcouru par un courant, un fil qu'on déplace, une aiguille aimantée révèlent les propriétés particulières de l'espace dans un champ magnétique. Mais cet état particulier existe même en l'absence du fil ou de l'aiguille aimantée qui nous ont servi à le déceler. De même qu'en un point de la salle de classe il existe une température même en l'absence de thermomètre.

*La grandeur qui définit les propriétés magnétiques en un point d'un champ est l'**induction magnétique**.*

Dans les paragraphes suivants nous allons préciser les divers éléments de l'induction.

4. L'induction magnétique possède une direction et un sens.

Nous savons tout de la température de l'air en un point de la classe lorsqu'on nous dit qu'elle est de 20°C, mais nous sommes incomplètement informé sur le courant d'air en ce point lorsqu'on nous dit que sa vitesse est 20 *cm/s*. Il faut ajouter comment cette vitesse est orientée, vers le bas de la porte par exemple.

Les grandeurs, telles que les vitesses, les forces...., dont la définition complète demande à la fois un nombre et une direction orientée sont appelées *grandeurs vectorielles*.

On les représente, sur les dessins, par des ***vecteurs***.

Les grandeurs, telle que la température, complètement définies par un nombre sont appelées *grandeurs scalaires*.

La force mécanique sur un courant, qui nous révèle l'existence d'un champ magnétique en un point, est un phénomène orienté possédant une direction et un sens déterminés.

Il doit en être de même de l'***induction magnétique*** qui définit l'état magnétique en ce point.

Par définition, l'induction a en un point :

— la ***direction*** que prend une *aiguille aimantée très fine et très courte*, placée au point considéré;

— le ***sens*** qui va du pôle sud au pôle nord de l'aiguille aimantée.

Expérience. — Plaçons une petite aiguille aimantée entre les branches d'un aimant en U. Nous obtenons ainsi, en un point, la direc-

tion de l'induction, perpendiculaire aux branches, et son sens, du pôle nord au pôle sud de l'aimant (fig. 5).

Déplaçons lentement l'aiguille. Dans l'espace compris entre les branches, sa direction reste fixe, l'induction magnétique y a même direction et même sens en tout point; un tel *champ magnétique* est dit *uniforme.*

On emploie parfois l'expression *sens du champ magnétique*, on veut indiquer ainsi le sens du vecteur induction au point considéré.

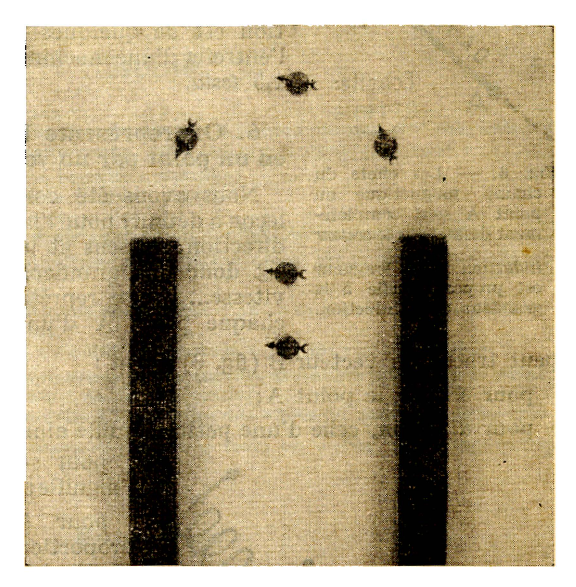


Fig. 5. — Les petites aiguilles aimantées indiquent la direction et le sens du vecteur induction en différents points. Entre les branches de l'aimant le champ est uniforme, les aiguilles sont parallèles.

5. L'induction magnétique est une grandeur mesurable.

Les effets magnétiques, en un point, sont plus ou moins intenses selon la proximité ou la taille de l'aimant ou de la bobine, *sources du champ magnétique*. On dit que l'induction en ce point est plus ou moins intense.

Pour préciser cette notion, choisissons un effet particulier : l'action d'un champ magnétique sur un courant;

1° par définition, *l'induction magnétique en un point d'un champ est proportionnelle à l'intensité de la force qui s'exerce sur un conducteur* donné parcouru par un courant donné;

2° l'unité d'induction est le *tesla* (symbole *T*) ainsi défini :

le **tesla** *est l'induction magnétique, en un point d'un champ magnétique uniforme, tel que la force appliquée à un conducteur rectiligne perpendiculaire à cette induction, parcouru par un courant de* ***1 ampère****, est de* ***1 newton par mètre de longueur.***

Le *tesla* est appelé *weber par mètre carré* (*Wb/m*²) par les électrotechniciens; on le nomme encore *myriagauss*, rappelant ainsi qu'il vaut

10 000 fois une autre unité souvent utilisée par les physiciens : le *gauss.*

1 *Wb/m*² = 1 *tesla* = 10 000 *gauss.*

Entre les branches d'un aimant en U l'induction est de quelques centièmes de *tesla,* dans l'entrefer d'une machine électrique elle est de 1 à 1,5 *tesla.*

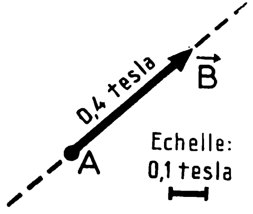


Fig. 6. — Les effets du champ magnétique au point A sont complètement définis par le *vecteur induction* $\vec{B}$. Sa longueur est proportionnelle à la grandeur de l'induction.

6. On représente l'induction magnétique en un point par un vecteur.

Nous avons été conduit au cours de cette leçon à définir, pour l'induction en un point, une direction, un sens et une intensité. L'induction est donc une grandeur comme une force, une vitesse... qui se représente par un vecteur. En chaque point A d'un champ magnétique on peut tracer un vecteur $\vec{B}$ (fig. 6) ayant :

pour *origine* le point A;

pour *direction,* celle d'une petite aiguille aimantée placée en ce point;

pour *sens,* le sens sud-nord de l'aiguille;

pour *longueur,* une longueur proportionnelle à l'intensité B de l'induction magnétique : par exemple 30 *mm* pour 0,3 *tesla.*

C'est le ***vecteur induction*** $\vec{B}$ au point A, il nous renseigne complètement sur les propriétés magnétiques de l'espace en ce point.



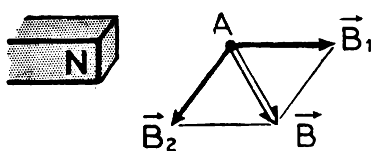


Fig. 7. — La bobine crée au point A une induction $\vec{B}_1$, l'aimant y produit une induction $\vec{B}_2$. Les deux sources agissant ensemble produisent en A l'induction $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

7. Induction magnétique produite par plusieurs sources de champ magnétique.

Les courants dans les conducteurs et les courants particulaires d'Ampère dans les aimants sont les seules *sources de champ magnétique.*

Si en un point de l'espace le champ magnétique est dû à plusieurs sources, le vecteur induction $\vec{B}$ en ce point est la ***somme géométrique***

des vecteurs $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$, .. que produiraient chaque source agissant séparément (fig. 7).

Les inductions magnétiques s'additionnent géométriquement comme les forces et toutes les grandeurs représentées par des vecteurs.

Résumé.

1. — Autour des aimants et des conducteurs parcourus par des courants de nombreux phénomènes se manifestent, dont les plus importants sont :

— action mécanique sur une aiguille aimantée;
— aimantation des corps dits magnétiques;
— action mécanique sur les courants;
— création de force électromotrice dans un conducteur en mouvement.

On dit que l'espace où se manifestent ces phénomènes est le siège d'un champ magnétique.

2. — Les propriétés magnétiques en un point d'un champ sont définies par l'induction magnétique en ce point.

L'induction magnétique en un point se représente par un vecteur $\vec{B}$ dont :

— la direction est la direction d'une petite aiguille aimantée placée en ce point;
— le sens est le sens sud-nord de cette aiguille;
— l'intensité est proportionnelle à l'intensité des effets du champ magnétique.

3. — L'unité d'induction magnétique est le tesla ou weber par mètre carré.

Exercices.

1. On approche l'extrémité d'une tige d'acier du pôle nord d'une aiguille aimantée :

a) le pôle nord est attiré; peut-on conclure de cette expérience que la tige d'acier est aimantée?

b) le pôle nord est repoussé; même question?

2. Les fréquences des oscillations (nombre d'oscillations par seconde) d'une même aiguille aimantée placée successivement dans divers champs magnétiques sont proportionnelles à la racine carrée des inductions magnétiques en ces divers points. On a $\frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}}$.

a) Placée dans le champ magnétique terrestre, une aiguille aimantée effectue 10 oscillations en 25 *secondes*. L'induction en un point de ce champ est 20 *microteslas*.

La même aiguille placée à l'intérieur d'une bobine effectue 80 oscillations en 25 *secondes*. Quelle est l'induction magnétique en ce point?

b) Une petite aiguille aimantée placée à 2 *cm* de l'axe d'un fil rectiligne parcouru par un courant effectue 20 oscillations en 32 *secondes*, à 4 *cm* elle effectue 20 oscillations en 45 *secondes*, à 8 *cm* 10 oscillations en 32 *secondes*.

Comment varie l'induction magnétique en fonction de la distance au fil dans le champ créé par le fil rectiligne.

Exploration des champs magnétiques.

1. Le spectre magnétique.

Expérience. — Au-dessus et très près d'un barreau aimanté plaçons une vitre ou une feuille de carton plane (fig. 1). A l'aide d'un tamis fin saupoudrons la vitre de limaille de fer. Lorsque nous tapotons légèrement pour faciliter leurs déplacements, nous voyons les grains de limaille se ranger en *files régulières* et dessiner des courbes dont l'ensemble se nomme *spectre magnétique* (fig. 2).

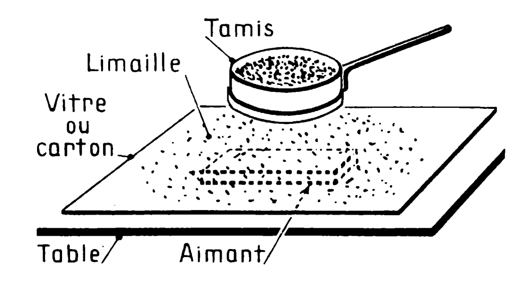


Fig. 1. — Comment on fait un spectre magnétique

Une très petite aiguille aimantée, placée sur la vitre en un point, s'oriente suivant la tangente à la file de limaille qui passe par ce point.

La *tangente* à la ligne de limaille qui passe par un point nous indique donc la *direction de l'induction* : une simple inspection du spectre magnétique, nous renseigne sur la direction de l'induction aux divers points du champ.

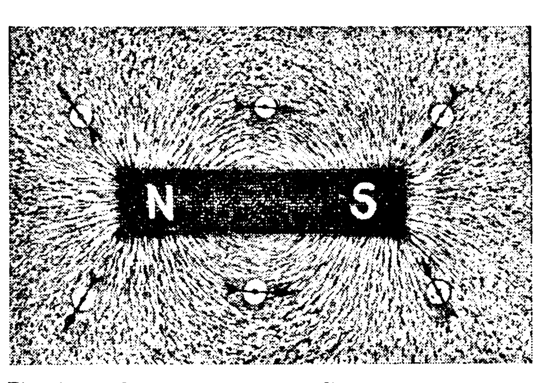


Fig. 2. — Spectre magnétique d'un barreau aimanté.

2. Les files de limaille dessinent des lignes d'induction.

Par définition, *une **ligne d'induction** est une courbe tangente en chacun de ses points au vecteur induction.* Par convention, on l'oriente dans le sens de ce vecteur (fig. 3).

Les files de limaille du spectre magnétique dessinent donc des lignes d'induction.

Du fait qu'en tout point d'un champ magnétique, il existe un vecteur induction $\vec{B}$, et qu'il n'en existe qu'un, il résulte :

1° *par chaque point d'un champ passe une ligne d'induction et une seule;* en conséquence :

les lignes d'induction ne se croisent jamais;

2° *il existe dans un champ magnétique* ***une infinité de lignes d'induction.***

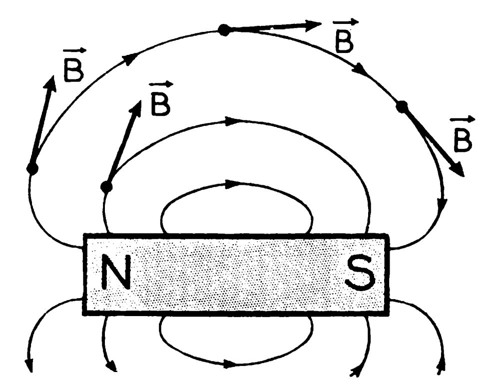


Fig. 3. — Le *vecteur induction* est tangent en chaque point d'une *ligne d'induction.*

Les files de limaille du spectre magnétique en matérialisent quelques-unes parmi cette infinité. De même, dans les dessins, on ne peut en représenter qu'un nombre limité, mais formant cependant un réseau suffisamment serré pour bien indiquer la direction de l'induction dans les régions intéressantes du champ.

3. Spectres magnétiques d'aimants.

a) aimant en U (fig. 4).

Entre les branches de l'aimant les lignes d'induction sont pratiquement des *droites parallèles.*

Chaque fois qu'il en est ainsi dans une portion de l'espace, le vecteur induction a non seulement *même direction* et *sens* en tout point de cette région, mais il a aussi *même valeur* (même nombre de *teslas* ou *weber par* m^2) : on dit que le *champ* est ***uniforme*** dans cette région. Nous reviendrons sur ce point dans la 35e leçon.

b) deux pôles de noms contraires face à face (fig. 5).

c) deux pôles de même nom face à face (fig. 6).

D'une façon générale dans les champs magnétiques ayant *pour sources des aimants* :

1° les lignes d'induction partent d'un pôle nord pour aboutir à un pôle sud;

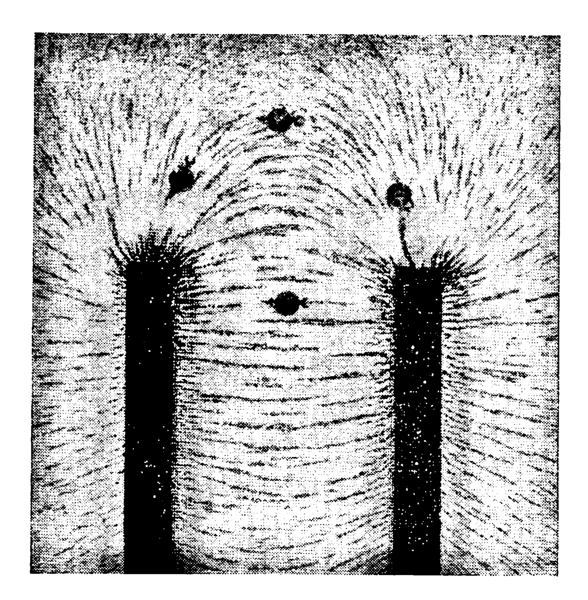


Fig. 4. — Spectre magnétique d'un aimant en U. Remarquer le parallélisme des lignes d'induction entre les branches de l'aimant.

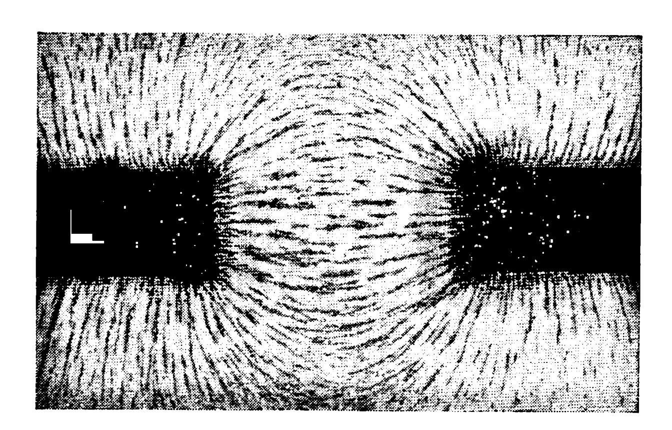


Fig. 5. — Spectre de 2 pôles de noms contraires placés face à face.

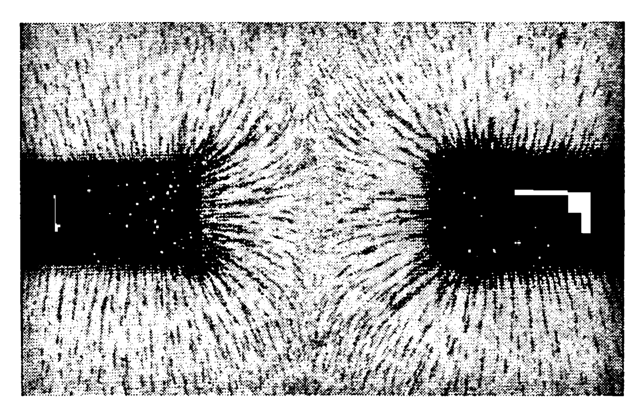


Fig. 6. — Spectre de 2 pôles de même nom placés face à face. Les lignes d'induction semblent se repousser.

2° aucune n'est fermée sur elle-même à l'extérieur de l'aimant.
Remarquons que les *régions polaires* d'un aimant sont séparées par des régions intermédiaires dites *neutres*, d'où ne partent et où n'arrivent aucune ligne d'induction.

4. Spectres magnétiques de courants.

a) une bobine circulaire plate.

Un fil de cuivre isolé est enroulé pour former une bobine plate de 50 spires. Cette bobine est disposée verticalement et une feuille de carton horizontale passe par son centre.

Faisons circuler un courant dans le fil et formons le spectre magnétique (fig. 7). Les lignes d'induction sont des cercles au voisinage des conducteurs. Elles se déforment pour tendre à devenir rectilignes à mesure qu'elles se rapprochent de l'axe de la bobine, mais elles enserrent toujours un conducteur.

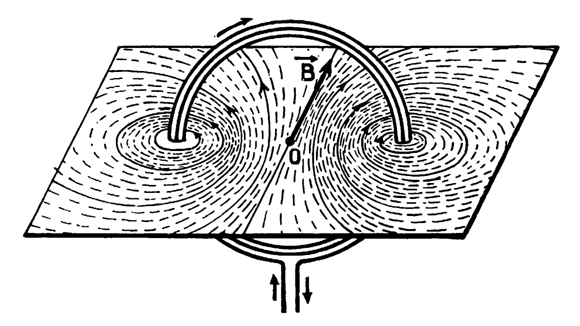


Fig. 7. — Spectre d'une *bobine circulaire plate.* Les lignes d'induction sont fermées, elles enserrent les conducteurs de la bobine.

b) une bobine cylindrique longue.

La bobine est formée d'une seule rangée de spires peu serrées. On réalise le spectre sur un carton horizontal convenablement percé pour le passage des spires de la bobine (fig. 8).

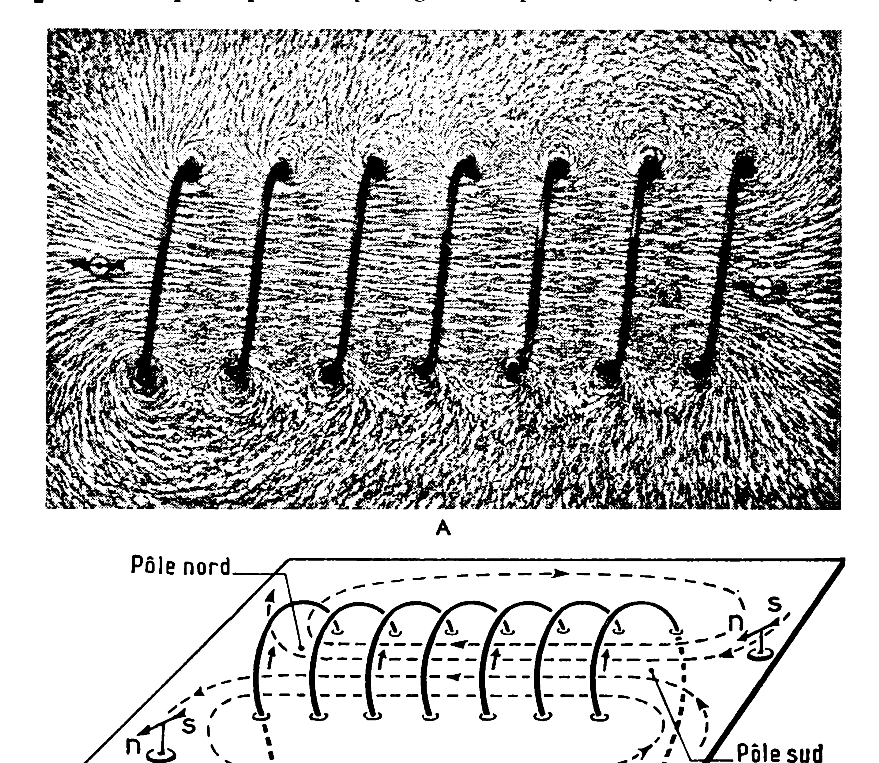


Fig. 8. — Spectre d'une *bobine longue* :
***a*) remarquer le parallélisme des lignes d'induction à l'intérieur de la bobine;**
b) les lignes d'induction vont du pôle nord au pôle sud *à l'extérieur* de la bobine, du pôle sud au pôle nord *à l'intérieur*.

Dans la région centrale *à l'intérieur de la bobine* les lignes d'induction sont sensiblement des droites parallèles : *le champ dans cette région est uniforme.*

A partir du sens du courant, repérons le pôle nord et le pôle sud de la bobine (32e leçon, § 5). Repérons ensuite *le sens des lignes d'induction* du spectre magnétique.

Nous constatons que ces lignes d'induction vont :

à l'extérieur de la bobine, du pôle nord au pôle sud;

à l'intérieur de la bobine, du pôle sud au pôle nord.

L'examen attentif montre que les *lignes d'induction* sont encore des *courbes fermées* qui enserrent des spires de la bobine. Les plus nombreuses enserrent la totalité des spires; cependant, autour des trous, on en voit qui n'enserrent qu'une spire. Mais il n'y en a *aucune qui n'enserre au moins une spire.*

D'une façon générale dans les champs magnétiques ayant *pour sources des courants* :

1° toute ligne d'induction est une courbe fermée sur elle-même;

2° elle enserre au moins une fois le conducteur du courant.

5. L'examen des spectres permet de prévoir le sens des actions mécaniques.

Il faut bien comprendre que les lignes d'induction ne représentent rien de matériel. Cependant on peut prévoir le sens des forces qui s'exercent sur les aimants ou les circuits électriques en appliquant la règle simple suivante :

les lignes d'induction tendent à se raccourcir et à s'écarter.

Exemples. — ***a)*** Deux pôles de noms contraires s'attirent, leur rapprochement raccourcit les lignes d'induction qui les relient.

b) Deux pôles de même nom se repoussent, leur éloignement permet aux lignes d'induction tassées entre les deux pôles de s'écarter.

c) Deux spires d'une bobine, parcourues par des courants de même sens, s'attirent, leur rapprochement diminue la longueur des lignes d'induction qui les enserrent.

6. Comparaison du spectre d'un barreau aimanté et de celui d'une bobine longue.

Le spectre du barreau est identique au spectre *à l'extérieur* de la bobine. Cette constatation confirme l'existence de *courants particulaires* dans le fer. Nous devons imaginer ces petits courants circulaires *alignés en files tout le long du barreau;* ces courants constituent ainsi un faisceau d'un très grand nombre de bobines juxtaposées de très faibles sections.

Nous devons alors supposer que *les lignes d'induction du barreau se prolongent à l'intérieur* de ces bobines, c'est-à-dire dans le fer, et qu'elles sont des courbes fermées.

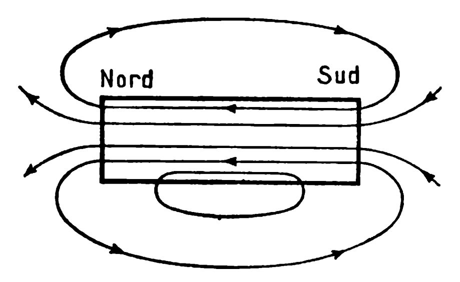


Fig. 9. — Les lignes d'induction d'un barreau aimanté pénètrent à l'intérieur du fer.

L'intérieur du barreau est le siège d'un champ magnétique, et l'état magnétique en chaque point y est défini par un *vecteur induction* $\vec{B}$. Les lignes d'induction dans l'aimant sont les prolongements des lignes d'induction dans l'air (fig. 9 et 11).

Les méthodes que nous connaissons pour mettre en évidence et pour mesurer l'induction (action sur une aiguille aimantée ou sur un courant) ne sont pas utilisables dans un solide comme le fer. Nous apprendrons dans la leçon suivante une méthode de mesure de l'induction magnétique, applicable à l'induction dans le fer.

Résumé.

1. — Avec de la limaille de fer on obtient un spectre magnétique qui matérialise un certain nombre de lignes d'induction.

La tangente à la ligne d'induction en un point est la direction de l'induction en ce point.

2. — Les lignes d'induction des aimants sortent du fer au pôle nord et y rentrent au pôle sud.

Les lignes d'induction d'un courant sont fermées sur elles-mêmes, elles enserrent toujours au moins un conducteur.

3. — Les forces entre aimants, ou circuits électriques, sont de sens tel que les lignes d'induction tendent à se raccourcir et à s'écarter.

4. — Les lignes d'induction pénètrent dans les corps aimantés à l'intérieur desquels il règne donc un champ magnétique.

Exercices.

1. Il est très instructif d'examiner et de comparer divers spectres magnétiques. Sur des feuilles de papier Ozalid, on préparera et fixera des spectres magnétiques avec :

1° un pôle seul d'un aimant droit placé debout;

2° deux aimants droits rapprochés par leurs pôles de noms contraires;
3° deux aimants droits rapprochés par leurs pôles de même nom;
4° d'un aimant droit dans le champ duquel est placé un barreau de fer doux;
5° deux bobines plates parcourues par des courants de même sens;
6° deux bobines plates parcourues par des courants de sens contraires, etc....

2. Examiner les spectres de la figure 10. A et B sont des fils électriques perpendiculaires au plan de la figure. Sur la figure 10 *a* le courant vient vers l'avant par A et va vers l'arrière pour B.

Déduire de l'aspect de ces spectres le sens des actions mécaniques s'exerçant entre les fils A et B.

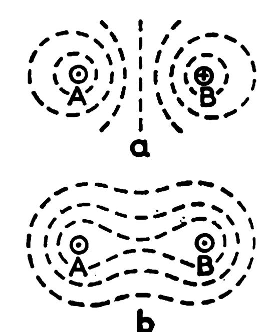


Fig. 10. — Exercice 2 : spectres magnétiques de deux courants rectilignes.
a) de sens contraires,
b) de même sens. Les fils sont perpendiculaires au plan de la figure.

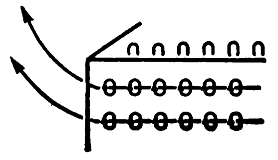


Fig. 11. — Les courants particulaires d'Ampère forment dans l'aimant des bobines longues juxtaposées, les lignes d'induction se prolongent à l'intérieur de ces bobines dans le fer.

Flux d'induction magnétique.

1. Définition du flux d'induction magnétique.

Considérons un *champ magnétique uniforme*. Les lignes d'induction sont des droites parallèles et l'induction B a la même valeur en tous les points du champ.

Une surface plane d'aire S est placée dans ce champ; soit α l'angle de la normale à la surface avec une ligne d'induction (fig. 1).

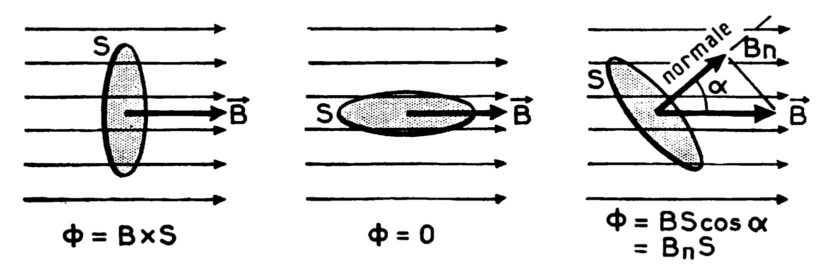


Fig. 1. — Le *flux d'induction* à travers une surface placée dans un champ magnétique uniforme dépend de l'orientation de la surface par rapport aux lignes d'induction.

Par définition, on appelle ***flux d'induction magnétique*** Φ[1] à travers la surface S la quantité :

$$\Phi = \boldsymbol{B}.\boldsymbol{S}.\cos\alpha.$$

Lorsque la surface est *parallèle* aux lignes d'induction, $\alpha = \pi/2$, le *flux est nul.*

Il est *maximum* lorsque $\alpha = 0$, la surface est alors *perpendiculaire* aux lignes d'induction, ce maximum est égal à $B \times S$.

2. L'unité de flux d'induction magnétique est le weber.

L'unité de flux magnétique est le ***weber*** (symbole Wb).

Le weber est le flux magnétique qui traverse une surface plane de 1 m² normale à un champ uniforme où l'induction magnétique est 1 weber par mètre carré soit 1 tesla.

1. La lettre grecque Φ se prononce *phi*.

On emploie aussi le *maxwell* qui correspond à une surface de 1 cm^2 et à une induction de 1 *gauss*. Comme 1 *tesla* vaut 10^4 *gauss* et 1 m^2 égale 10^4 cm^2, on a :

$$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ maxwells.}$$

3. Flux d'induction magnétique à travers une bobine.

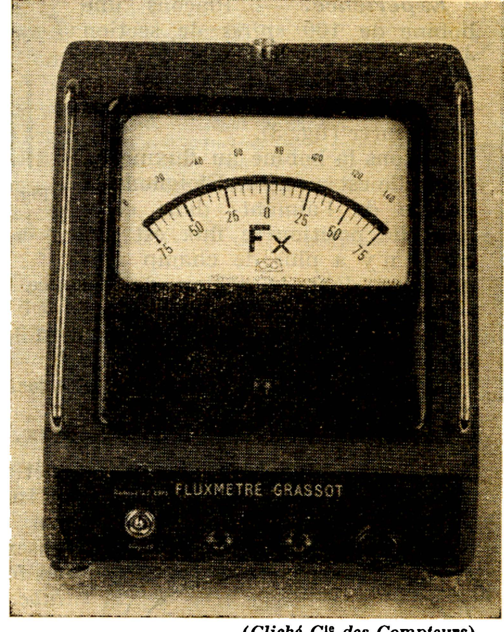
Le flux magnétique à travers une spire plane est égal au flux à travers la surface plane que limite cette spire.

Le flux *à travers une bobine* de N spires planes est la somme des flux à travers chacune des spires. Soit S l'aire d'une spire, le flux à travers la bobine placée perpendiculairement aux lignes d'induction est :

$$\underset{\text{webers}}{\Phi} = N \, . \, \underset{\text{teslas}}{B} \; \underset{m^2}{S}.$$

Les lignes d'induction peuvent entrer dans la bobine par sa face sud ou par sa face nord; pour distinguer ces deux cas nous adoptons la convention suivante :

le flux qui traverse une bobine est positif lorsqu'il entre par la face sud du circuit, il est négatif quand il entre par sa face nord.



(*Cliché Cie des Compteurs*).

Fig. 2. — Vue d'un fluxmètre.

4. Le fluxmètre mesure les variations de flux.

Nous indiquerons le principe de son fonctionnement dans la 50e leçon. Contentons-nous d'apprendre à nous en servir.

L'aiguille est mécaniquement en équilibre indifférent : placée en un point quelconque de la graduation, elle y reste au repos (fig. 2).

Chaque division à droite et à gauche du zéro correspond à 2.10^{-4} *weber*, soit 0,2 *milliweber*.

Relions les deux bornes du fluxmètre par un fil double torsadé à une bobine traversée par une flux Φ_1, l'aiguille ne bouge pas. Faisons varier

le *flux,* par exemple en modifiant l'orientation de la bobine, *l'aiguille du fluxmètre se déplace.* Elle s'arrête lorsque le flux ne varie plus.

Soit Φ_2 la nouvelle valeur du flux et *d* le nombre de divisions dont s'est déplacée l'aiguille. La *variation de flux* $\Phi_2 - \Phi_1$ est $d \times 2.10^{-4}$ *weber.* Si l'on connaît Φ_2 on peut déterminer Φ_1 et inversement.

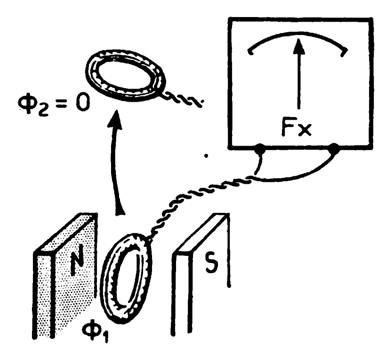


Fig. 3. — Un fluxmètre indique la variation du flux à travers sa bobine de mesure.

Expérience. — Plaçons une bobine de 100 *spires* de section 4 *cm²* entre les branches d'un aimant en U. Elle est traversée par un flux Φ que nous nous proposons de mesurer (fig. 3).

Relions la bobine au fluxmètre, l'aiguille est au zéro. Eloignons la bobine de l'aimant; dans cette nouvelle position le flux est nul car il n'y a plus de champ magnétique dans la région de l'espace où la bobine se trouve.

La variation de flux est donc $\Phi - 0 = \Phi$.

Pendant le retrait de la bobine, l'aiguille du fluxmètre s'est déplacée, elle est arrêtée devant la division 8.

Le flux $\Phi = 8 \times 2.10^{-4} = 16.10^{-4}$ *weber* ou 1,6 *milliweber.*

5. Le tube d'induction ou tube de flux.

Considérons, dans un champ magnétique, l'ensemble des lignes d'induction qui s'appuient sur une courbe fermée. Cet ensemble constitue une surface, en forme de tube, qu'on appelle *tube d'induction* ou *tube de flux.*

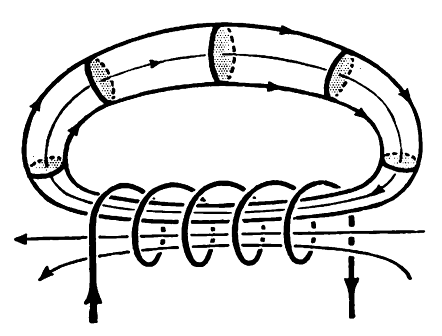


Fig. 4. — Un ***tube d'induction*** est formé par les lignes d'induction qui s'appuient sur une courbe fermée.

Les lignes d'induction sont fermées sur elles-mêmes, il en est de même d'un tube de flux.

Dans le *champ d'un courant,* loin de toute substance magnétique, le tube est tout entier dans l'air; il est enserré par le conducteur et inversement (fig. 4).

Dans le *champ d'un aimant,* le tube va *du pôle nord au pôle sud dans l'air* et se ferme *du pôle sud au pôle nord dans le fer aimanté* (fig. 5).

6. Le flux d'induction magnétique a même valeur à travers toutes les sections d'un même tube de flux.

C'est une *propriété extrêmement importante* que l'on utilise constamment dans le calcul des machines électriques.

Soit un tube de flux suffisamment étroit pour que nous puissions considérer que l'induction a la même valeur sur toute la surface d'une section.

Coupons le tube par un plan 1 normal aux lignes d'induction. Soit S_1 l'aire de la section et B_1 l'induction en tous les points de cette section. Le flux à travers cette section est B_1S_1 (fig. 6).

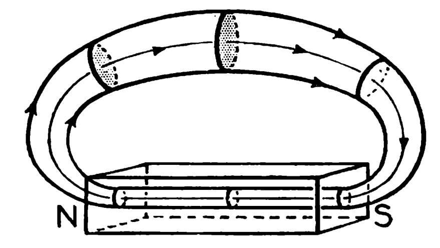


Fig. 5. — Dans le champ d'un aimant, un tube d'induction va du pôle nord au pôle sud dans l'air; il se ferme dans le fer aimanté du pôle sud au pôle nord.

Coupons le tube par un plan 2 normal. Soit S_2 l'aire de la section et B_2 l'induction. Le flux à travers cette section est B_2S_2.

Notre énoncé signifie que :

$$B_1S_1 = B_2S_2 = B_3S_3 = \dots = \Phi.$$

La valeur commune de ces produits est le *flux à travers le tube d'induction.*

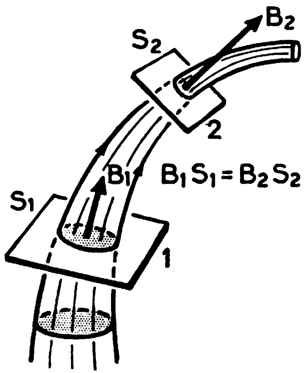


Fig. 6. — Le flux d'induction a même valeur à travers toutes les sections d'un même tube d'induction.

Cette propriété s'établit expérimentalement *dans l'air.* On détermine la forme des lignes d'induction du champ; on trace un tube d'induction et avec des bobines s'appuyant sur ce tube reliées à un fluxmètre on mesure le flux à travers différentes sections du tube. On vérifie bien qu'il est constant.

Dans le fer, cette vérification n'est plus possible car nous ne pouvons tracer expérimentalement les lignes d'induction et placer une bobine autour du tube d'induction.

Par définition, nous admettrons que le flux à travers le tube conserve la même valeur que dans l'air.

7. Induction magnétique dans le fer. Sa mesure.

La propriété étudiée ci-dessus nous donne un moyen de définition et de mesure de l'induction magnétique B dans le fer.

L'*induction*, comme le montre la formule B = Φ : S est une *densité de flux;* c'est pourquoi on adopte souvent pour nom de son unité l'expression ***weber par mètre carré.***

Expérience. — Soit à mesurer l'induction dans la section médiane d'un barreau aimanté prismatique de 4 × 2 *cm* de section. Entourons-le de 50 *spires* reliées au fluxmètre (fig. 7); retirons la bobine et amenons-la assez loin de l'aimant de façon que le flux qui la traverse devienne nul. L'aiguille du fluxmètre se déplace de 15 divisions, indiquant une variation de flux de $15 \times 2.10^{-4} = 3.10^{-3}$ *weber*. Le flux à travers la section du barreau est $\Phi = \frac{3.10^{-3}}{50} = 6.10^{-5}$ *weber*. L'aire de cette section est 8 $cm^2 = 8.10^{-4}$ m^2.
L'induction dans le barreau est donc $\frac{6.10^{-5}}{8.10^{-4}} = 0{,}075$ *tesla* ou 750 *gauss.*

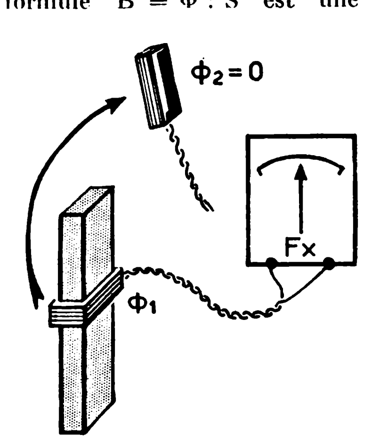


Fig. 7. — Mesure de l'induction magnétique à l'intérieur d'un barreau aimanté.

8. Deux conséquences de la constance du flux dans un tube d'induction.

1° Lorsque la section d'un tube d'induction va en diminuant, l'induction va en croissant. De l'examen du spectre magnétique on peut donc tirer des renseignements sur les valeurs relatives des inductions aux divers points : *l'induction augmente quand on se déplace dans la direction où les lignes d'induction se rapprochent.*

2° Dans une région où *les lignes d'induction sont parallèles,* les tubes sont des cylindres de section constante : l'induction a la même valeur en tout point de cette région. Le *champ magnétique* y est *uniforme,* c'est le cas entre les branches d'un aimant en U ou à l'intérieur d'une bobine longue.

Résumé.

***1.* — Le flux d'induction magnétique à travers une surface de S mètres carrés, perpendiculaire à un champ uniforme d'induction B teslas est :**

$$\Phi = B \times S.$$

L'unité de flux magnétique est le weber.

2. — Le fluxmètre mesure des variations de flux magnétique ; si le flux initial ou final est connu, on mesure ainsi des flux.

3. — Un tube d'induction est une surface fermée sur elle-même formée par un ensemble de lignes d'induction.

Le flux magnétique est le même à travers toutes les sections d'un même tube d'induction.

4. — L'induction dans le fer se calcule en divisant le flux, mesuré au fluxmètre, par la section ; c'est une densité de flux magnétique.

Exercices.

1. Quelle est l'induction d'un champ uniforme qui produit un flux de 0,01 *weber* à travers une surface plane de 5 dm^2 normale aux lignes d'induction.

2. L'induction du champ magnétique terrestre est de 46 *microteslas*. Calculer le flux magnétique à travers une bobine circulaire de 20 spires dont le diamètre moyen est de 1 *m* placée normalement aux lignes d'induction. Que devient le flux lorsqu'on tourne a bobine de 90° autour d'un axe perpendiculaire aux lignes d'induction.

La bobine est reliée à un fluxmètre dont la constante est 0,1 *milliweber* par division. Quel est le déplacement de l'aiguille du fluxmètre pendant cette rotation?

Imaginer une méthode de mesure de l'induction du champ terrestre basé sur cet exercice.

3. Un cadre rectangulaire 10 × 20 *cm* est placé dans un champ uniforme. Les côtés de 10 cm sont perpendiculaires aux lignes d'induction; les côtés de 20 *cm* font un angle de 30° avec ces lignes.

Dessiner le tube d'induction qui s'appuie sur ce cadre; en déduire le flux qui traverse le cadre l'induction étant de 0,01 *tesla*. Vérifier que ce résultat est en accord avec la définition du flux d'induction magnétique donnée au paragraphe 1.

4. Une bobine de 75 spires entoure la partie médiane d'un aimant en U de section rectangulaire 6 × 1,5 *cm*. La bobine est reliée à un fluxmètre de constante 0,1 *milliweber* par division. Lorsqu'on retire la bobine et l'éloigne de l'aimant l'aiguille du fluxmètre se déplace de 60 divisions. Calculer l'induction dans la section médiane de l'aimant.

Lorsque la bobine est placée dans l'air entre les branches de l'aimant, le fluxmètre dévie de 10 divisions si on éloigne la bobine de l'aimant. En examinant le spectre magnétique d'un aimant en U, pouvez-vous expliquer ce résultat? Calculer l'induction magnétique entre les branches de l'aimant.

5. Examiner les spectres magnétiques d'une bobine longue et d'une bobine plate (fig. 7 et 8 de la 34e leçon) et dire pour chacun d'eux dans quelle région du champ l'induction est la plus grande.

LECTURE

Les spectres magnétiques.

Ce mode de représentation est fort exact; il rend dans l'enseignement d'incontestables services et son emploi a suggéré à plusieurs praticiens de véritables découvertes. **Il est utile dans là pratique industrielle de s'habituer à voir, pour ainsi dire**

en imagination, ces lignes idéales que le spectre magnétique rend tangibles.

Il ne faudrait pas toutefois donner à cette expérience une extension illégitime : le flux magnétique qui traverse normalement une surface est le produit de cette surface par la valeur de l'induction; il n'est, en rien, une émanation plus ou moins mystérieuse que produirait d'une façon continue l'aimant créateur du champ; il nous donne seulement une sorte de mesure de la modification permanente apportée par l'aimant dans la région considérée.

LUCIEN POINCARÉ,
L'Electricité (*Librairie Flammarion*).

Champ magnétique des courants
Les ampère-tours.

Un courant électrique modifie l'espace autour de lui; il y crée un *champ magnétique*. Ce phénomène très important fut découvert, en 1819, par le physicien danois ***Œrsted***.

Dans cette leçon, nous allons étudier les champs magnétiques créés par quelques circuits de forme simple, lorsqu'il *n'y a pas de corps ferro-magnétique dans le voisinage*.

1. Champ magnétique d'un courant rectiligne.

1° *Forme et sens des lignes d'induction.*

Expérience. — Un conducteur rectiligne assez long AB traverse une plaque, de carton ou de plexiglas, horizontale, normale au fil et saupoudrée de limaille de fer. Quelques petites aiguilles aimantées sont disposées régulièrement autour du fil.

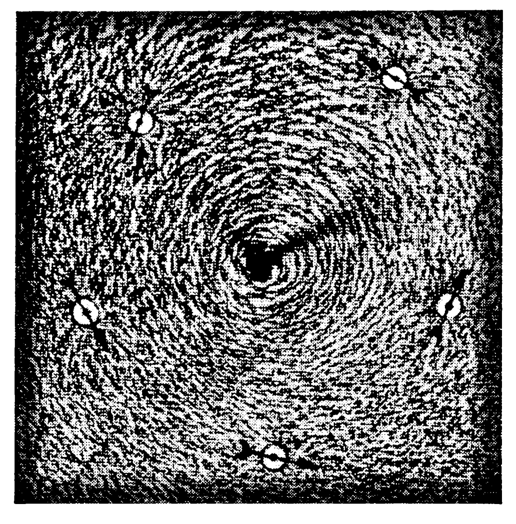


Fig. 1. — Spectre magnétique produit par un *courant rectiligne* perpendiculaire au plan de la figure. Le courant vient vers l'avant.

Faisons passer dans le fil un courant assez intense, au moins 40 A[1]; la limaille dessine les *lignes d'induction*, ce sont des *circonférences centrées sur le fil*. Les aiguilles sont tangentes à ces circonférences (fig. 1).

Inversons le sens du courant : la forme du spectre magnétique ne change pas, mais tous les magnétomètres tournent de 180°. *Le sens de l'induction s'est inversé.*

1. On peut utiliser 10 conducteurs rectilignes parallèles parcourus chacun par un courant de 4 A.

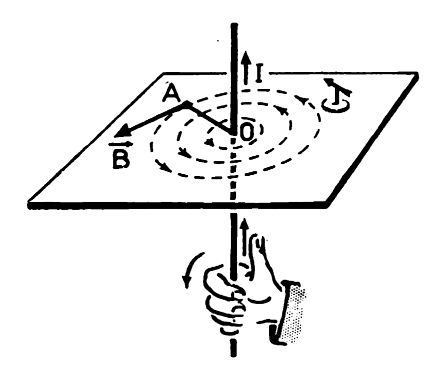


Fig. 2. — ***Règle de la main droite :*** prenons le conducteur dans la main droite à demi ouverte, le pouce étant allongé dans le sens du courant; les autres doigts donnent le sens des lignes d'induction.

Le champ magnétique produit par un courant rectiligne très long est de révolution autour du fil. Dans un plan perpendiculaire au conducteur ***les lignes d'induction sont des circonférences centrées sur le fil.***

En un point le ***vecteur induction*** $\vec{B}$ est tangent à la ligne d'induction qui passe par ce point, il est donc ***orthogonal au courant.*** Son ***sens*** est lié au sens du courant, on peut le retrouver par la ***règle de la main droite*** (fig. 2).

2° ***Intensité de l'induction magnétique.***

Des mesures précises montrent que l'induction magnétique en un point est :

proportionnelle à l'intensité I du courant;
inversement proportionnelle à la distance d du point au fil;

Dans les milieux non magnétiques, l'air par exemple, et lorsque la distance d est petite par rapport à la longueur du fil, l'induction B a pour valeur :

$$\underset{teslas}{B} = \frac{2}{10^7}\frac{I}{d}\frac{ampères}{mètres}.$$

Par exemple, pour
I = 10 A et
$d = 2\,cm = 0{,}02\ m$
B = 10^{-4} *tesla* = 1 *gauss.*

C'est une induction faible, insuffisante pour orienter les grains de limaille.

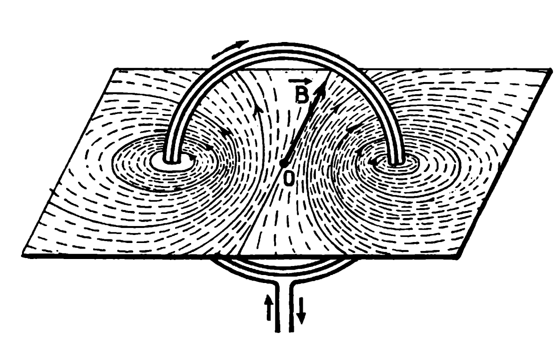


Fig. 3. — Spectre magnétique d'une bobine plate ou d'un courant circulaire.

2. Champ magnétique d'un courant circulaire.

Nous avons observé dans la 34e leçon le spectre magnétique du champ créé par une bobine plate à spires circulaires. La figure 3 rappelle la forme et le sens des lignes d'induction. Nous pouvons retrouver ce

sens en appliquant une des règles déjà étudiées, en effet, ***les lignes d'induction sortent de la bobine par sa face nord.***

Il est souvent commode de se servir de la ***règle dite du tire-bouchon de Maxwell :*** *un tire-bouchon placé dans l'axe de la bobine, tournant dans le sens du courant, se déplace dans le sens des lignes d'induction* (fig. 4).

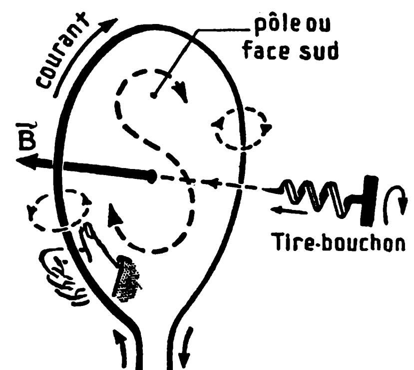


Fig. 4. — On peut trouver le ***sens du champ magnétique*** créé par une spire, en appliquant une des règles suivantes :
a) lettres N ou S sur la face;
b) main droite;
c) tire-bouchon de Maxwell.

L'***induction au centre*** d'une bobine plate circulaire de N *spires*, de rayon *r mètres*, a pour valeur :

$$B = \frac{2\,\pi}{10^7}\frac{NI}{r} \text{ teslas ou } Wb/m^2.$$

3. Champ produit par une bobine en forme de tore ou d'anneau.

Expérience. — Nous utilisons une bobine réalisée avec un fil conducteur rigide enroulé régulièrement de façon que l'ensemble de la bobine forme un tore d'axe vertical. Une feuille de carton est disposée suivant un plan diamétral horizontal du tore.

Saupoudrons cette feuille de limaille de fer et plaçons quelques

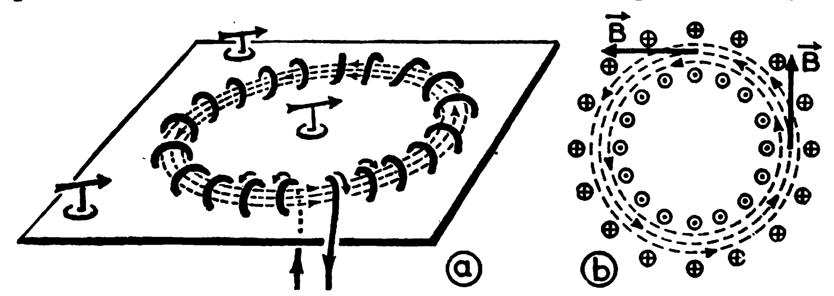


Fig. 5. — Spectre magnétique du champ créé par une ***bobine en forme d'anneau*** :
a) vue perspective;
b) vue de dessus.
Les lignes d'induction sont des circonférences.

aiguilles aimantées à l'intérieur et à l'extérieur de la bobine.

Faisons passer dans le fil un courant d'une dizaine d'ampères, quelques chocs sur le carton et le spectre se dessine. Observons-le (fig. 5).

A l'intérieur de la bobine, les lignes d'induction sont des circonférences centrées sur l'axe. Leur sens est encore donné, par la règle de la main droite ou celle du tire-bouchon appliquée à une spire.

A l'extérieur du tore les aiguilles restent orientés sud-nord, la bobine ne crée pas de champ magnétique.

Soit N le *nombre total de spires,* l la longueur en *mètres* de la ligne d'induction moyenne; l'induction B à l'intérieur de la bobine est donnée par la formule :

$$B = \frac{4\pi}{10^7}\frac{N}{l}I \quad (1)$$

Le produit NI est appelé le ***nombre d'ampères-tours*** (abréviation ***At***).

Le quotient $\frac{N}{l}$ est le nombre de spires par mètre de longueur de la ligne d'induction. Posons $\frac{N}{l} = n_1$, le produit $n_1 I$ est ***le nombre d'ampères-tours par mètre*** (abréviation ***At/m***); $4\pi.10^{-7}$ vaut environ $1{,}25.10^{-6}$ dont l'inverse est 800 000, la formule (1) peut donc s'écrire :

$$B = 1{,}25.10^{-6}\, n_1 I = \frac{n_1 I}{800\,000}.$$

L'induction en *teslas* ou *Wb/m*² dans un tore vaut $1{,}25.10^{-6}$ fois le nombre d'***At/m.*** Il est simple de se souvenir qu'il faut 800 000 *At/m* pour obtenir 1 *Wb/m*² dans l'air.

4. Champ dans une bobine longue (solénoïde).

Nous en avons fait le spectre magnétique (34e leçon § 4 *b*). Le champ est sensiblement uniforme à l'intérieur de la bobine, loin des extrémités (fig. 6). Son sens est donné par les règles étudiées précédemment.

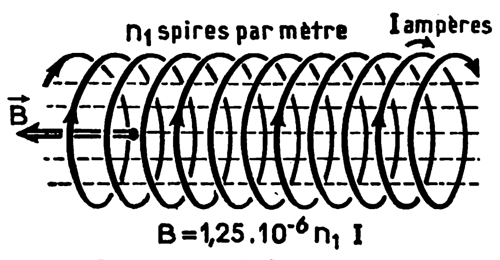


Fig. 6. — **La partie centrale d'une bobine longue peut être considéré comme faisant partie d'une bobine annulaire de très grand rayon :** ***le champ y est uniforme.***

Lorsque la *longueur de la bobine est grande* devant son diamètre, on peut considérer la partie centrale comme faisant partie d'un tore bobiné de très grand rayon. L'induction dans cette région a pour valeur :

$$\underset{\text{teslas ou } Wb/m^2}{B} = 1{,}25.10^{-6}\ \underset{At/m}{n_1 I.}$$

n_1 désignant le nombre de spires par mètre de la bobine.

Cette formule n'est plus applicable aux points voisins des extrémités. Si la bobine n'est pas très longue cette formule donne, même dans la partie centrale, une valeur trop forte. L'erreur atteint 3 %, par exemple, au centre d'une bobine dont la longueur n'est que 4 fois le diamètre.

5. Trois règles générales.

Des différents cas examinés ci-dessus et de tous ceux analogues que nous pourrions étudier, on tire trois règles qui s'appliquent chaque fois qu'il y a production d'un champ magnétique par un circuit électrique.

1. *L'induction en un point du champ est proportionnelle à l'intensité du courant* dans le circuit.

2. Les *lignes d'induction* sont des *courbes fermées* qui enserrent une ou plusieurs spires du circuit.

On dit qu'une ligne d'induction enserre le circuit lorsque, en assimilant cette ligne fermée à un nœud coulant qui se ferme, le conducteur reste pris : s'il est pris une fois, deux fois, ..., N fois on dit que la ligne d'induction enserre 1 spire, 2 spires, ... N spires du circuit (fig. 7).

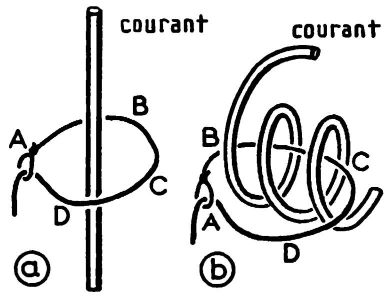


Fig. 7. — Si l'on serre le nœud coulant le courant rectiligne est enserré *une fois*, le circuit (*b*) est enserré trois fois.

Si N est le nombre de spires enserrées par la ligne d'induction et I l'intensité qui les traverse, la ligne d'induction enserre NI *ampères-tours*.

3. Le *sens des lignes d'induction* est donné par la règle de la *main droite*, celle du *tire-bouchon* ou l'une des règles donnant le nom des faces d'une bobine. Tous ces moyens sont équivalents.

6. Une loi fondamentale due à Ampère.

Le flux dans un tube d'induction donné ne dépend que du nombre d'ampères-tours enserrés par ce tube.

Expliquons cette loi sur un exemple.

Dans le champ d'un fil rectiligne parcouru par un courant I_1, isolons par la pensée un mince tube d'induction en forme de tore, de section S m^2, dont la ligne d'induction moyenne est un cercle de rayon d (fig. 8). Le flux dans ce tube est $\Phi = B \times S$; B est donnée par la formule $B = \frac{2}{10^7}\frac{I_1}{d}$; introduisons dans cette formule la longueur de la ligne d'induction $l = 2\pi d$, en remplaçant d par $\frac{2\pi}{l}$ on obtient : $B = \frac{4\pi}{10^7}\cdot\frac{I_1}{l}$, le flux est alors $\Phi = \frac{4\pi S}{10^7\, l} \times I_1$.

On peut *obtenir le même tube d'induction* en utilisant, à la place du fil rectiligne, un enroulement de N_2 spires régulièrement réparties sur le tore. Soit I_2 le courant, nous avons alors $B = \frac{4\pi}{10^7}\frac{N_2I_2}{l}$, soit un flux

$$\Phi = \frac{4\pi}{10^7}\frac{S}{l} \times N_2I_2.$$

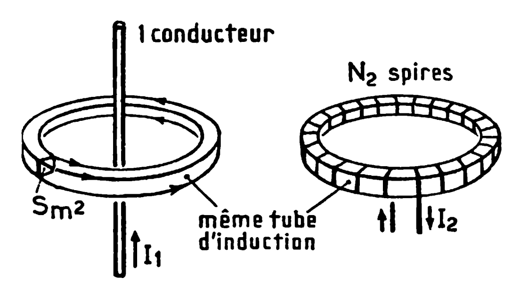


Fig. 8. — Le conducteur rectiligne et la bobine en forme d'anneau produisent le *même flux* dans le même tube d'induction, lorsque $I_1 = NI_2$.

Pour avoir le *même flux*, nous devons avoir : $I_1 = N_2I_2$.

Or N_2I_2 est le nombre d'ampères-tours enserrés par le tube d'induction dans le cas de la bobine, alors que I_1 représente les ampères-tours dans le cas du fil rectiligne qui n'est enserré qu'une fois par le tube.

Résumé.

1. — Un circuit parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique.

L'induction en un point est proportionnelle à l'intensité du courant dans le circuit.

Les lignes d'induction sont des courbes fermées qui enserrent une ou plusieurs spires du circuit; leur sens est donné par la règle de la main droite ou par celle du tire-bouchon; leur forme dépend de la forme du circuit.

2. — A l'intérieur d'une bobine annulaire les lignes d'induction sont des circonférences; l'induction y est proportionnelle au nombre d'ampères-tours par mètre n_1 I de la bobine (*At/m*) :

$$B = 1{,}25.10^{-6}\, n_1\, I \text{ teslas ou Wb/m}^2.$$

3. — A l'intérieur d'un solénoïde, le champ est uniforme, parallèle à l'axe de la bobine. L'induction y a même valeur que dans une bobine annulaire ayant le même nombre d'At/m.

4. — Le flux dans un tube d'induction donné ne dépend que du nombre d'ampères-tours enserrés par ce tube.

Exercices.

1. Une ligne électrique est formée de deux conducteurs rectilignes, parallèles, très longs. Ces conducteurs sont parcourus par un courant d'intensité 50 *A*. Leur distance d'axe en axe est 10 *cm*.

Déterminer l'induction magnétique en un point situé :

a) à égale distance des deux conducteurs : 5 *cm*;

b) à égale distance des deux conducteurs : 10 *cm*;

c) dans le plan des deux conducteurs à 5 *cm* de l'un et 15 *cm* de l'autre.

2. Deux bobines circulaires de même centre O et de même rayon 10 *cm* sont parcourues par un courant de 4 *A*. La première comprend 20 spires, la deuxième 40 spires. Leurs plans sont perpendiculaires. Déterminer la direction et la valeur de l'induction magnétique au point O.

3. Une bobine annulaire a une section carrée de 5 *cm* de côté et une longueur moyenne de 80 *cm*. On veut qu'un courant de 1 *A* produise un flux de 10^{-5} *wéber* à travers une section droite de la bobine. Calculer :
a) l'induction dans la bobine;
b) le nombre d'ampères-tours par mètre nécessaires pour obtenir cette induction;
c) le nombre total de spires à bobiner.

4. Calculer l'induction magnétique à l'intérieur d'un solénoïde de 30 *cm* de long, portant 480 spires, traversées par un courant de 5 *A*.

5. Une bobine a 25 *cm* de long. On veut y produire une induction magnétique de 0,02 Wb/m^2 avec un courant de 10 *A*. Combien faudra-t-il d'ampères-tours par mètre? Combien de spires par mètre? Combien de spires au total?

L'enroulement est fait de fil de cuivre de 20/10, qui, isolé, mesure 25/10 *mm*. Quel sera le nombre de spires par couche? Combien la bobine comportera-t-elle de couches?

6. L'induction magnétique, produite en son centre par une bobine cylindrique de diamètre 2 a comportant n_1 spires par mètre bobinées sur une longueur l, est donnée par la formule :

$$B = 4\,\pi.10^{-7}\,\frac{n_1 I}{\sqrt{1 + 4\frac{a^2}{l^2}}}.$$

Calculer, en fonction de l'induction au centre d'une bobine très longue ayant le même nombre de spires par mètre et parcourue par le même courant, l'induction au centre d'une bobine dont :
a) la longueur vaut 10 fois le diamètre;
b) la longueur vaut 4 fois le diamètre.

LECTURE. — AMPÈRE (1775-1836).

Un savant danois, Œrsted, *découvre, en* 1819, *par un heureux hasard, qu'un courant électrique fait dévier l'aiguille d'une boussole placée dans son voisinage.*

Les 4 *et* 11 *septembre* 1820, François Arago *répète à Paris, devant l'Académie des Sciences, les expériences d'Œrsted* Ampère, *académicien depuis* 1814, *assiste à ces séances; il s'intéresse passionnément aux phénomènes dont il est le témoin : il répète les expériences, les multiplie, variant les conditions, faisant des mesures, des calculs. Il établit ainsi des lois expérimentales. Il travaille avec une incroyable rapidité; les dates des procès-verbaux de ses communications à l'Académie sont des plus suggestives :*

18 *septembre* 1820. — « *M. Ampère lit un Mémoire concernant des expériences qui lui sont propres...* ».

25 *septembre* 1820. — « *M. Ampère lit un Mémoire sur les effets produits sur l'aiguille magnétique par la pile voltaïque* ».

9 *octobre* 1820. — « *M. Ampère lit un troisième Mémoire contenant la suite de ses recherches...* ».

Les communications continuent les 16 *et* 30 *octobre;* 6, 13, 27 *novembre;* 4, 11 *et* 26 *décembre;* 8 *et* 15 *janvier* 1821; *le* 2 *avril* 1821 *,notice d'ensemble; le* 8 *avril, mémoire récapitulatif !*

En quelques mois, Ampère avait créé l'un des chapitres les plus importants de la science électrique : l'électromagnétisme, et rendu son nom immortel.

Le plus célèbre de ses ouvrages : **Théorie mathématique des phénomènes électromagnétiques** *fut publié en* 1827.

***

Vingt ans avant le début des recherches d'Ampère, en 1800, VOLTA *avait inventé la pile électrique, mettant à la disposition des chercheurs le premier générateur de courant continu.*

En 1831, FARADAY *découvrit les courants d'induction qui prennent naissance dans les conducteurs déplacés dans les champs magnétiques. L'induction donne le moyen d'obtenir des courants de puissance considérable par transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. L'électromagnétisme, qui rend possible la construction de moteurs électriques, permet la transformation inverse. Ainsi, dès* 1831, *les bases de l'industrie électrique moderne sont établies.*

1800 — 1819 — 1831, *trois dates qui marquent trois grandes étapes dans la science de l'électricité.*



Fig. 9. — Ampère (1775-1836). Savant français.

***

André-Marie Ampère naquit à Lyon le 20 *janvier* 1775.

Il passa son enfance et sa jeunesse à Poleymieux, petit village de la banlieue lyonnaise, dans une maison que deux Américains achetèrent en 1928 *et donnèrent à la Société française des Electriciens pour être conservée comme « un symbole de l'admiration universelle que la science porte au grand génie d'Ampère ».*

André Ampère montra, dès l'âge de huit ans, de merveilleuses dispositions pour les études les plus difficiles : il avait une mémoire prodigieuse, une imagination vive, une intelligence puissante. Il ne fréquenta aucun établissement scolaire. Son père, négociant en soieries, guida ses premières études. Quand l'enfant eut douze ou treize ans, il continua à travailler seul. Et que n'apprit-il pas? Littérature, latin, botanique, chimie, physique, mathématiques, etc., il étudia tout. Dès dix-huit ans, il était, en mathémaques par exemple, l'émule de tous les savants, ses contemporains.

Quand il lui fallut choisir un métier, car la petite fortune de ses parents avait fondu pendant la Révolution, il se fit professeur. Il passa du Lycée de Bourg à celui de Lyon, puis devint répétiteur d'analyse à l'Ecole polytechnique où il fut ensuite professeur, puis professeur au Collège de France et Inspecteur général de l'enseignement secondaire. Chacune des étapes de sa carrière fut marquée par des travaux originaux faisant progresser la science.

Il mourut d'une pneumonie le 11 *juin* 1836, *à l'infirmerie du lycée de Marseille, au cours d'un voyage d'inspection.*

***

Ampère fut un génie encyclopédique. « Il sait tout, il comprend tout, il pénètre au delà de tout », a-t-on dit de lui. Il s'intéressa à toutes les sciences, à la poésie, à la philosophie. Dans sa jeunesse, il ébaucha des tragédies et écrivit des vers dont l'harmonie

fluide est comparable à celle des poèmes qui firent, plus tard, la gloire de Lamartine. Ses découvertes en mathématiques jalonnèrent sa carrière universitaire. Ses spéculations philosophiques inspirèrent Victor Cousin et peut-être Auguste Comte. Mais c'est en tant que physicien qu'il mérita une célébrité universelle.

Chose étonnante : cet homme, gauche dans ses mouvements, lent dans ses allures, myope à l'extrême, dont l'étourderie et la distraction sont légendaires, fut le plus ingénieux et le plus adroit des constructeurs d'appareils de physique et un maître de la méthode expérimentale.

Expérimentateur hors de pair, mathématicien éminent capable des synthèses théoriques les plus élevées, il est le type du grand physicien.

Ses qualités de cœur égalaient ses qualités d'esprit. Ampère était modeste, timide, simple et bon, sa vie fut semée de dures épreuves. Il avait dix-huit ans quand son père mourut sur l'échafaud. Il perdit, après quatre ans d'union, sa première femme qu'il aimait beaucoup. Un second mariage ne lui apporta que de pénibles déceptions. La versalité de son fils, les malheurs de sa fille le tourmentèrent. Il souffrit aussi vivement des désastres de la France; en 1815, au lendemain de Waterloo, il écrivait : « Je suis comme le grain entre deux meules, rien ne pourrait décrire les déchirements que j'éprouve..., il faut surtout que je fuie ceux qui me disent « Vous ne souffrez pas personnellement », comme s'il pouvait être question de soi au milieu de semblables catastrophes. »

9. — AIMANTATION

37e LEÇON

Aimantation.

Étude qualitative.

1. Un barreau d'acier doux s'aimante quand on le place dans une bobine traversée par un courant.

Expériences. — 1° Faisons passer un courant dans une bobine. Avec une aiguille aimantée, repérons la polarité de ses extrémités.

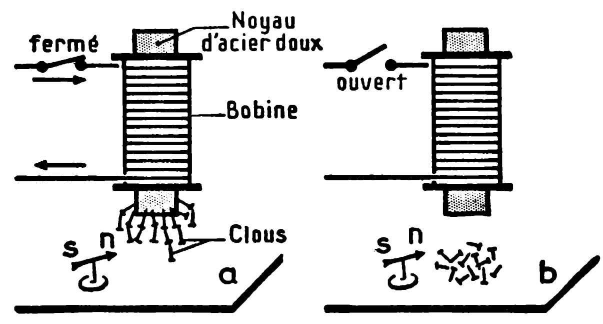


Fig. 1. — Un noyau d'*acier doux* s'aimante dans une bobine parcourue par un courant. Lorsqu'on coupe le courant l'aimantation ne disparaît pas complètement.

2° Introduisons un barreau *d'acier doux* dans la bobine. Le barreau s'aimante : nous constatons en effet qu'il attire fortement des clous assez lourds. Une aiguille aimantée montre que le barreau a même polarité que la bobine (fig. 1 *a*).

La bobine se nomme *bobine magnétisante*, le barreau est le *noyau* de la bobine.

3° Coupons le courant. Les clous tombent. L'aiguille aimantée montre que l'aimantation n'a pas complètement disparu (fig. 1 *b*), mais elle a beaucoup diminué. Ce qu'il en reste, est nommé *aimantation rémanente*.

2. Un barreau d'acier dur s'aimante comme un barreau d'acier doux, mais il conserve une forte aimantation rémanente.

Expériences. — 1° Recommençons l'expérience précédente en prenant comme noyau un barreau d'*acier trempé*, un outil de tour ou une lime par exemple. Faisons passer un courant dans la bobine : le noyau s'aimante (fig. 2 *a*).

Coupons le courant : *le noyau reste aimanté*, en d'autres termes son aimantation rémanente est plus grande que celle d'un noyau d'acier doux (fig. 2 *b*).

Le barreau d'acier trempé est devenu un ***aimant permanent***.

2° Pour inverser le courant dans la bobine, inversons le sens des connexions aux bornes du générateur, puis, en partant de zéro, faisons

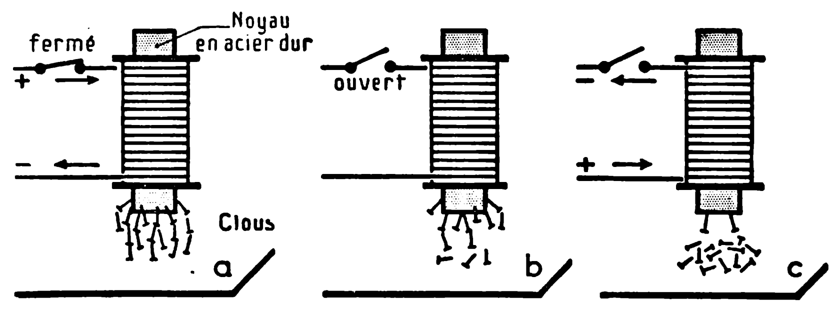


Fig. 2. — Un noyau d'acier dur s'aimante également (*a*), son aimantation rémanente est assez grande (*b*).
On peut désaimanter le noyau en le plaçant dans un champ magnétique de sens inverse (*c*), l'interrupteur est fermé.

croître très lentement le courant magnétisant. Les clous se détachent les uns après les autres du noyau qui perd son aimantation (fig. 2 *c*).

Un noyau d'acier aimanté se désaimante lorsqu'on le place dans un champ magnétique de sens opposé,

Si nous continuons à faire croître l'intensité du courant, le noyau s'aimante à nouveau mais en sens inverse.

3. Les propriétés magnétiques disparaissent à température élevée.

Expériences. — 1° Un morceau d'aiguille en acier a été aimanté. Chauffons-le au rouge sur un bec Bunsen. Quand l'aiguille est refroidie, elle n'attire plus la limaille de fer : elle n'est plus aimantée.

2° Chauffons au rouge une petite plaque de fer. Tant qu'elle est rouge, elle n'est pas attirée par un aimant. L'attraction se produit à nouveau quand la plaquette est refroidie.

Les propriétés magnétiques de l'acier disparaissent vers 780°. A cette température, que l'on nomme le point de Curie, il se produit donc une transformation dans la structure de l'acier.

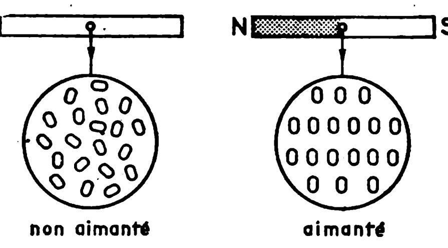


Fig. 3. — Vues très agrandies d'un point à l'intérieur d'une substance.

4. Explication de l'aimantation.

Dans une substance magnétique non aimantée, les courants particulaires circulant au sein des atomes existent mais ils ont toutes les orientations possibles : ils ne produisent pas d'effet magnétique appréciable parce qu'en moyenne leurs actions se compensent.

Lorsqu'on place cette substance dans une bobine parcourue par un courant, le champ magnétique de la bobine oriente ces petits courants qui forment alors des files régulières (fig. 3). Ces solénoïdes créent des champs magnétiques intenses qui s'ajoutent à celui de la bobine magnétisante : la substance est aimantée.

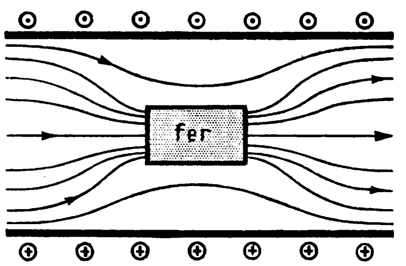


Fig. 4. — Un morceau de fer placé dans un champ uniforme modifie la forme des lignes d'induction qui se resserrent dans le fer.

5. L'introduction d'un morceau de fer dans un champ magnétique le modifie profondément.

Expériences. — 1° Comme nous l'avons déjà fait, formons le spectre magnétique du champ à l'intérieur d'un solénoïde : dans la partie centrale le champ est uniforme.

2° Plaçons un petit barreau d'acier doux dans le milieu de la bobine et formons à nouveau le spectre magnétique. Il a l'aspect de la figure 4. Les lignes d'induction du champ magnétique du solénoïde sont déformées.

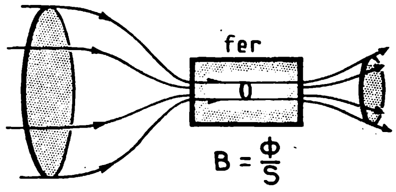


Fig. 5. — La section d'un même tube d'induction est beaucoup plus faible dans le fer que dans l'air. L'induction dans le fer est beaucoup plus grande.

Les lignes d'induction se dirigent vers le fer; dans le barreau la section d'un tube d'induction diminue beaucoup, il en résulte que l'induction dans le fer est beaucoup plus grande que celle qui existait dans la même région avant l'introduction du barreau d'acier doux (fig. 5).

6. Expliquons la forme de ce spectre magnétique.

En l'absence de fer, le courant dans la bobine, seule source, produit un champ magnétique uniforme d'induction B_0 parallèle à l'axe.

En présence de fer, il existe *deux sources de champ* :

— le courant dans la bobine,

— les courants particulaires du fer orientés par suite de l'aimantation.

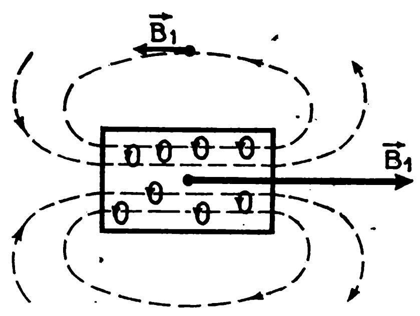


Fig. 6. — Les courants particulaires du fer produisent un champ magnétique d'induction B_1.

Ces courants particulaires produisent un champ identique à celui d'un aimant droit caractérisé par une induction $\vec{B}_1$ (fig. 6).

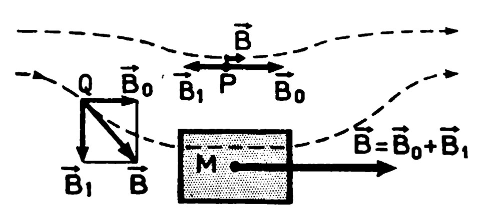


Fig. 7. — En chaque point, l'induction magnétique $\vec{B}$ est la somme géométrique de l'induction $\vec{B}_0$ produite par la bobine et de l'induction $\vec{B}_1$ produite par le barreau.

En chaque point, l'induction du champ réel est :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1.$$

A l'intérieur du fer, au point M, $\vec{B}_0$ et $\vec{B}_1$ ont même direction et même sens (fig. 7) : $B = B_0 + B_1$, d'où une très grande augmentation de la valeur de l'induction;

A l'extérieur du fer, au point P, $\vec{B}_1$ est opposé à $\vec{B}_0$: $B = B_0 - B_1$, c'est une zone où l'induction est faible;

— au point Q : $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$, d'où la direction de la ligne d'induction passant par ce point.

7. L'aimantation est contrariée par un champ démagnétisant produit par l'aimantation elle-même.

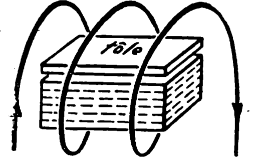


Fig. 8. — L'aimantation de la tôle, produite par la bobine, est contrariée par le *champ démagnétisant* produit par le barreau.

Une tôle d'acier ajoutée contre le barreau précédent (fig. 8) est aimantée par le champ magnétique régnant dans cette région (point P) donc par l'induction $B = B_0 - B_1$, bien inférieure à B_0

Le même phénomène se produit à l'intérieur du barreau : nous devons l'imaginer comme constitué par un empilement de tranches minces, chaque tranche tendant à diminuer le champ qui aimante les autres.

Si bien qu'*une tranche donnée* est aimantée par les actions du champ de la bobine que l'on dit *magnétisant*, et du champ produit par toutes les autres tranches. Ce champ est toujours opposé au champ magnétisant, on l'appelle pour cela ***champ démagnétisant***.

8. Un anneau d'acier ne produit pas de champ démagnétisant.

Au lieu d'un barreau, considérons un anneau d'acier entouré d'une bobine annulaire; les files de courants particulaires, résultant de l'aimantation de l'anneau, forment eux aussi des bobines annulaires sans action magnétique extérieure (fig.9).

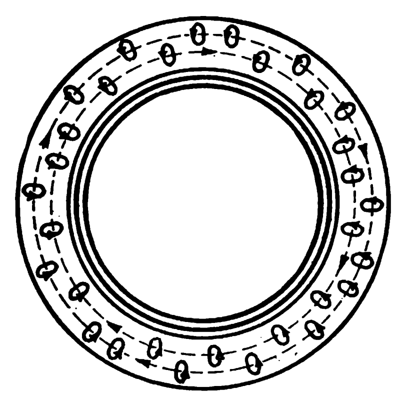


Fig. 9. — Les courants particulaires de l'anneau extérieur sont sans action magnétique sur l'anneau intérieur.

Le champ, qui aimante un deuxième anneau placé contre le premier, n'est dû qu'à la bobine magnétisante. *Le champ démagnétisant est nul.*

Un anneau d'acier, placé à l'intérieur de la bobine annulaire, est aimanté uniquement par les ampères-tours de cette bobine. On peut alors étudier simplement son aimantation, nous le ferons dans la prochaine leçon.

Avec une bobine très longue aimantant un barreau long par rapport à ses dimensions transversales le champ démagnétisant est souvent négligeable.

Résumé.

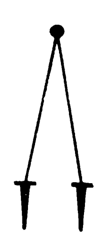
1. — Quand on place un morceau d'acier doux dans un champ magnétique le morceau d'acier doux s'aimante. Un morceau d'acier dur s'aimante également et devient un aimant permanent.

2. — L'aimantation d'une substance résulte de l'orientation en files régulières des courants particulaires existant au sein de la substance.

3. — L'introduction d'un morceau de fer dans un champ magnétique le modifie profondément; en particulier l'induction dans le fer est beaucoup plus grande que celle qui existait dans l'air dans la même région.

4. — Dans un barreau court, l'aimantation est contrariée par un champ démagnétisant; au contraire dans un anneau l'induction ne dépend que des At/m de la bobine magnétisante.

Exercices.



1. Deux pointes en acier doux sont suspendues par des fils fins. On place, au-dessous des pointes, le pôle nord d'un aimant droit, les pointes s'écartent (fig. 10). Expliquer cette expérience. Que se passe-t-il lorsqu'on retire l'aimant?

Mêmes questions avec des pointes en acier dur.

2. On place deux petites tôles d'acier doux, à l'intérieur d'une bobine. Lorsqu'on fait passer un courant dans la bobine les tôles se repoussent. Expliquer cette expérience.

On inverse le courant dans la bobine, que se passe-t-il?

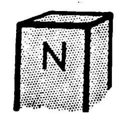


Fig. 10. Exercice 1.

Courbes d'aimantation, Hystérésis.

Dans un anneau constitué d'un matériau magnétique, le champ démagnétisant est nul; produisons le champ magnétisant par une bobine annulaire, enroulée autour de l'anneau. L'induction qui produit l'aimantation est $B_0 = 4\pi . 10^{-7} n_1 I$, elle dépend uniquement des *ampères-tours par mètre* de la bobine.

Proposons-nous d'étudier comment varie l'induction dans un anneau magnétique lorsque l'on fait varier les ***At/m*** *magnétisants.*

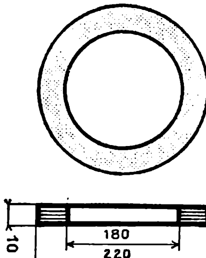


Fig. 1. — Dimensions de l'anneau en tôles d'acier doux employé pour déterminer une courbe d'aimantation.

1. L'appareillage et la méthode de mesure.

a. ***L'anneau.*** Il se compose de 20 tôles d'acier doux, épaisses de 0,5 *mm*, découpées chacune en forme d'anneau de 2 *cm* de largeur avec un diamètre moyen de 20 *cm*, et empilées les unes sur les autres. Le noyau a une section rectangulaire de 2 cm^2 et une longueur moyenne de $\pi \times 0{,}2 = 0{,}628$ *m* (fig. 1).

b. ***L'enroulement magnétisant*** est formé de 314 spires de fil de 1,5 *mm* isolé. Il y a ainsi $n_1 = 314 : 0{,}628 = 500$ *spires par mètre* de la longueur moyenne.

c. ***Montage électrique.*** Le courant de la bobine magnétisante est réglé par un rhéostat capable d'en faire varier l'intensité dans de larges limites; il est mesuré par un ampèremètre. Un inverseur permet d'en changer le sens (fig. 2).

d. ***Montage et emploi du fluxmètre.*** Lorsqu'un courant passe dans la bobine, l'acier s'aimante, mais rien ne nous permet de nous en apercevoir car les lignes d'induction restent toutes dans l'acier.

Nous pouvons cependant mesurer le flux grâce au fluxmètre.

Pour cela entourons une région du tore par un petit enroulement de 50 *spires* relié au fluxmètre : c'est la *bobine de mesure.*

Si B est l'induction dans l'acier, la bobine de mesure est traversée par un flux $\Phi = B \times S \times N = B \times 2.10^{-4} \times 50 = 10^{-2}B$ soit 0,01 B *weber.*

Pour déterminer ce flux, souvenons-nous qu'un fluxmètre ne mesure que des variations de flux, qu'il est donc nécessaire de connaître le flux initial.

Partons d'un *métal n'ayant jamais subi d'aimantation*, ou pour lequel toute trace d'aimantation a été soigneusement éliminée.

Donnons au rhéostat sa valeur maximum et réglons le fluxmètre au zéro.

Établissons le courant, sa valeur est I_1, le fluxmètre dévie de d_1 divisions : le flux dans la bobine de mesure est $\Phi_1 = d_1 \times 2.10^{-4}$ *weber* (une division du fluxmètre correspond à 2.10^{-4} Wb) puisque le flux initial était nul.

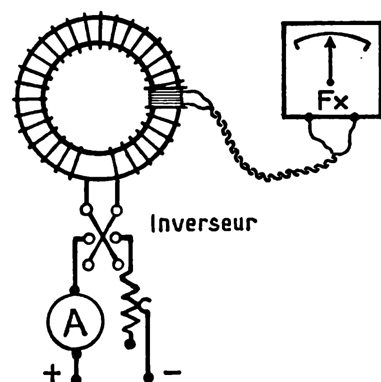


Fig. 2. — L'anneau est recouvert d'un enroulement dans lequel on peut faire varier le courant. Un fluxmètre associé à une bobine de mesure détermine le flux d'induction dans l'anneau.

Diminuons la résistance du rhéostat, le courant devient I_2 *ampères*; l'aiguille du fluxmètre se déplace de la division d_1 à la division d_2. indiquant un accroissement de flux $\Delta\Phi = (d_2 - d_1)2.10^{-4}$; le flux à travers la bobine de mesure est devenu $\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta\Phi = d_2 \times 2.10^{-4}$.

Nous pouvons recommencer ainsi en donnant au courant des valeurs toujours croissantes.

2. La mesure : courbe d'aimantation.

Expérience. — Effectuons les mesures décrites ci-dessus. Les lectures de l'ampèremètre, les mesures de Φ et les résultats des calculs des A*t*/*m* magnétisants et de l'induction B sont consignés dans le tableau suivant :

COURANT I *ampères*	A*t*/*m* 500 I	FLUX en *weber*	INDUCTION en *tesla* ou *Wb*/*m*² $B = 100\ \Phi$
0,25	125	$2{,}5.10^{-3}$	0,25
0,5	250	5.10^{-3}	0,5
1	500	10.10^{-3}	1
2	1 000	13.10^{-3}	1,3
4	2 000	15.10^{-3}	1,5
6	3 000	$15{,}8.10^{-3}$	1,58
10	5 000	$16{,}8.10^{-3}$	1,68

Traçons la courbe représentant l'induction B en fonction des ampères-tours par mètre magnétisants. Nous obtenons la courbe de la figure 3 : c'est la ***courbe de première aimantation*** de l'acier doux formant le tore.

3. Les résultats.

Les courbes d'aimantation des divers matériaux ferro-magnétiques (aciers, fonte, alliages divers) présentent des différences notables. Mais elles ont des caractères communs : elles débutent par une partie rectiligne OA (fig. 3), se continuent par une partie courbe AB, puis redeviennent à peu près rectiligne dans la région BC avec une pente beaucoup plus faible qu'au départ.

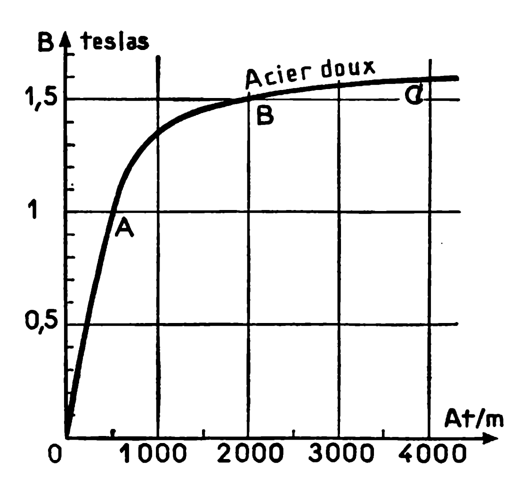


Fig. 3. — *Courbe d'aimantation d'un acier doux.*
OA, partie rectiligne : *l'acier n'est pas saturé*;
AB, partie courbe : *coude de saturation*;
BC, partie rectiligne : *l'acier est saturé.*

Au début, pour les champs magnétisants faibles, l'induction *croît proportionnellement aux ampères-tours par mètre;* de plus elle croît très vite : on dit que *le matériau n'est pas saturé.*

La partie courbe est appelée le *coude de saturation.*

Dans la partie rectiligne qui suit le coude, c'est-à-dire pour des champs magnétisants intenses, il faut une très grande augmentation des *At/m* pour obtenir une augmentation faible d'induction : *la substance est saturée,* tous les courants particulaires sont orientés dans la direction du champ.

Voici quelques résultats qui vous permettront de tracer la courbe d'aimantation d'un ***acier coulé*** :

At/m	500	2 600	6 600	11 200	18 000	20 000
B teslas	1	1,5	1,7	1,8	1,9	2

Le tableau ci-dessous, relatif à la ***fonte***, explique pourquoi ce matériau n'est plus employé dans les parties magnétiques des machines électriques; à induction égale elle exige beaucoup plus d'*At/m* que l'acier coulé.

At/m	2 300	10 000	13 600	18 600	26 500	38 000
B teslas	0,5	1	1,1	1,2	1,3	1,4

4. Perméabilité d'une substance.

Revenons au paragraphe 2. Dans un *tore rempli d'air* l'induction B_0 serait $4\pi.10^{-7} n_1$ I; par exemple, pour I = 0,25 A

$$B_0 = 4\pi.10^{-7}.125 = 0,156.10^{-3} \textit{ tesla.}$$

L'introduction de l'acier doux a porté l'induction à B = 0,25 *tesla;* elle l'a multiplié par $\frac{0,25}{0,156.10^{-3}} = 1\,600$.

On dit que, dans ces conditions, la ***perméabilité relative*** de l'acier doux est 1 600.

La perméabilité relative d'une substance indique combien de fois, à égalité d'*At/m* magnétisants, l'induction est plus grande dans ce corps que dans l'air. On la désigne ordinairement par la lettre grecque μ (*mu*).

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Complétons le tableau du paragraphe 2, en calculant pour chaque ligne B_0 et μ.

B	0,25	0,5	1	1,3	1,5	1,68
B_0	$0,156.10^{-3}$	$0,312.10^{-3}$	$0,625.10^{-3}$	$1,25.10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$	$6,25.10^{-3}$
μ	1 600	1 600	1 600	1 080	600	270

Nous remarquons que la *perméabilité* d'une substance magnétique ***n'est pas constante.***

Grande pour les champs magnétisants faibles, elle garde la même valeur jusqu'au coude de saturation; puis elle diminue progressivement. Pour des champs magnétisants très grands, elle tend vers 1, valeur correspondant aux substances non magnétiques.

La perméabilité relative n'est pas employée pour les calculs numériques industriels, mais elle est souvent commode pour écrire les formules.

On désigne sous le nom de ***perméabilité absolue*** d'une substance le quotient de l'induction B par les At/m magnétisants n_1I; dans ces conditions la ***perméabilité absolue de l'air*** sera $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$.

5. L'hystérésis complique l'étude de l'aimantation.

Expérience. — Reprenons les mesures qui nous ont permis de déterminer la courbe d'aimantation.

Après avoir atteint, par valeurs croissantes, la valeur maximale du courant magnétisant I = 8 A, faisons décroître ce courant. Pour chaque variation du courant, mesurons avec le fluxmètre la variation du flux à travers la bobine de mesure; puis calculons l'induction B dans l'anneau correspondant à chaque valeur de I.

Rassemblons nos résultats dans le tableau suivant :

I	8	5	2	1	0,5	0 *ampères*
At/m	4 000	2 500	1 000	500	250	0
B	1,6	1,58	1,4	1,25	1,1	0,88 *teslas*

Si nous traçons la courbe représentant B en fonction des *At/m*, nous constatons qu'elle n'est pas identique à celle de première aimantation. A une valeur déterminée des *At/m* correspond une valeur plus grande de l'induction; il semble qu'il y ait un *retard à la désaimantation.*

On donne à ce phénomène le nom d'***hystérésis.***

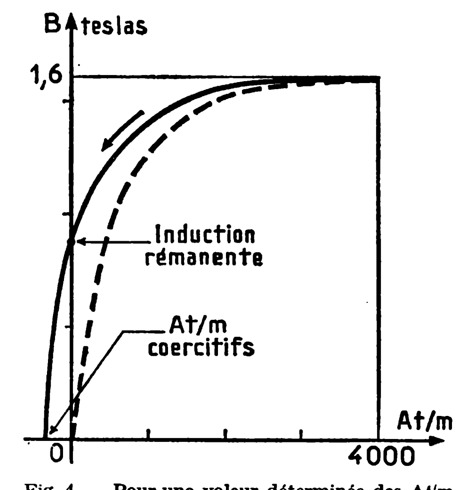


Fig. 4. — **Pour une valeur déterminée des *At/m* magnétisants, l'induction est plus grande lorsque la substance a déjà été aimantée. Il y a *retard à la désaimantation*, c'est le *phénomène d'hystérésis*.**

Lorsque les ***At/m*** créés par l'enroulement sont nuls, la substance reste aimantée, une induction dite ***induction rémanente*** subsiste dans le métal (fig. 4). Pour l'acier étudié, l'induction rémanente est 0,88 *tesla* ou *Wb/m*².

Inversons le sens du courant dans la bobine magnétisante, convenons d'affecter du signe — les intensités du courant ayant ce sens.

Augmentons progressivement la valeur absolue de l'intensité; lorsque I = — 0,5 A, l'induction est nulle.

Les *At/m* correspondant, à une désaimantation complète, soit ici 250 *At/m*, sont les ***At/m coercitifs***, on les appelle aussi ***champ coercitif.***

Continuons à augmenter l'intensité du courant, l'aimantation s'inverse. Affectons du signe — les valeurs de B, car l'induction est en sens inverse du sens initial.

Pour I = — 1 A, soit — 500 *At/m* : B = — 0,5 *tesla*, valeur très inférieure à celle de la courbe de première aimantation. C'est encore une conséquence de l'hystérésis qui retarde l'aimantation.

L'induction pour un nombre d'At/m déterminé dépend de l'aimantation antérieure, les corps ferro-magnétiques sont doués de mémoire.

6. Cycles d'hystérésis.

Le phénomène d'hystérésis rend l'étude de l'aimantation très difficile; pour connaître l'induction dans un échantillon d'acier, il faut connaître non seulement les *At/m* magnétisants auxquels il est soumis mais également ceux qui ont agi précédemment sur lui.

Le phénomène se simplifie lorsque le courant magnétisant varie régulièrement entre deux valeurs égales et de sens inverse. L'expérience montre que *la courbe d'aimantation prend alors l'allure d'une courbe fermée* appelée ***cycle d'hystérésis.***

Réglons l'intensité du courant à 8 *A*; avant de commencer les mesures inversons une dizaine de fois le sens du courant.

Partons d'un courant le plus intense + 8 *A*, soit + 4 000 *At/m*; relevons la courbe d'aimantation pour des intensités passant de + 8 *A* à — 8 A. Nous obtenons la branche ABC du cycle de la figure 5.

L'intensité passant ensuite de — 8 *A* à + 8 *A*, nous obtenons la branche CDA du cycle.

Remarquons que ce cycle est symétrique par rapport au point O.

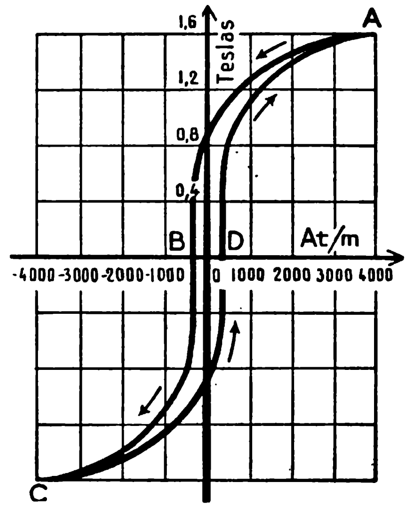


Fig. 5. — *Cycle d'hystérésis* d'un acier doux. L'*induction rémanente* est 0,88 *tesla* et le *champ coercitif* 250 *At/m.*

7. Le cycle d'hystérésis de l'acier dur est différent de celui de l'acier doux.

Ces deux courbes sont rapprochées sur la figure 6. Leur comparaison vous montre que le cycle de l'acier dur est large, tandis que celui de l'acier doux est étroit. Le phénomène d'hystérésis est plus marqué pour l'acier dur. En particulier le *At/m* coercitifs sont plus grands pour l'acier dur, environ 1 300 *At/m*, celui-ci se désaimante difficilement.

8. L'hystérésis est parfois utile.

C'est ce phénomène qui permet la réalisation des aimants permanents. Les matériaux qui, comme l'acier dur, ont un *cycle d'hystérésis large* et des *At/m coercitifs importants* sont des ***matériaux magnétiques durs.***

Ce sont, par exemple, en plus de l'acier dur, les aciers au tungstène et au cobalt et certains alliages plus complexes que nous étudierons dans la prochaine leçon.

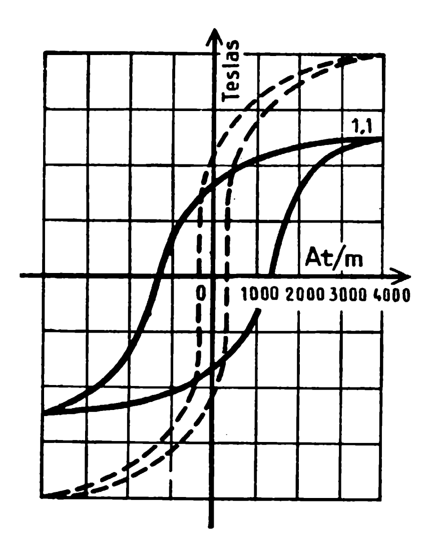


Fig. 6. — Comparaison du cycle d'hystérésis d'un acier dur (trait continu) à celui d'un acier doux (pointillé). Le champ coercitif de l'acier dur est plus grand.

9. L'hystérésis produit un dégagement de chaleur.

L'hystérésis a pour conséquence un dégagement de chaleur dans la substance, quand celle-ci est soumise à de nombreux cycles successifs d'aimantation. C'est le cas dans les machines à courant alternatif.

On démontre que *la quantité de chaleur produite à chaque cycle est proportionnelle à la surface du cycle.*

Pour 1 *kilogramme* d'acier doux, l'énergie transformée en chaleur, pour un cycle dont les valeurs extrêmes sont B = 1,5 *teslas* et B = — 1,5 *teslas*, est de l'ordre de 0,1 *joule*. La *perte de puissance* dans le cas de 50 cycles par seconde est d'environ 5 *watts.*

On réduit ces pertes en employant à la construction des machines électriques, des ***matériaux magnétiques doux*** ayant un *cycle d'hystérésis étroit*, donc de faibles pertes. Ce sont les tôles d'acier au silicium employées en construction électrique, les alliages fer-nickel et les ferrites douces comme le « Ferroxcube » utilisés en électronique.

Résumé.

1. — L'induction dans un anneau constitué d'un matériau magnétique ne dépend que des At/m de l'enroulement magnétisant.

La courbe d'aimantation d'une substance représente les valeurs de l'induction B en fonction des At/m magnétisants.

L'induction n'est pas proportionnelle aux At/m.

Pour l'acier doux jusqu'à 500 At/m et 1 tesla, on admet en pratique que la courbe d'aimantation est une droite.

2. — La perméabilité relative d'une substance indique combien de fois, à égalité d'At/m, l'induction est plus grande dans ce corps que dans l'air.

La perméabilité diminue lorsque les At/m augmentent.

3. — L'induction dans un corps magnétique, produite par des At/m de valeur déterminée, est plus grande lorsque le champ décroît que lorsqu'il croît. C'est le phénomène d'hystérésis.

Les aciers doux ont un cycle d'hystérésis étroit, les aciers durs ont un cycle large.

4. — Les phénomènes d'hystérésis ont pour conséquence une transformation d'énergie électrique en chaleur et causent ainsi des pertes dans les machines électriques.

Exercices.

1. Tracer, sur du papier millimétrique, la courbe d'aimantation d'une tôle dite «supérieure», spéciale pour la construction des machines à courants alternatifs. Les mesures ont donné les résultats suivants :

At/m	*B*	*At/m*	*B*
1 000	1,31	10 000	1,74
2 000	1,46	20 000	1,87
4 000	1,58	30 000	1,96
8 000	1,70	40 000	2,01

Sur le même graphique, tracer en pointillé la courbe de la perméabilité relative.

2. Tracer, sur du papier millimétrique, la courbe d'aimantation :

1° de l'acier coulé;
2° de la fonte.

3. Combien faut-il d'*At/m* pour obtenir 0,8 *Wb/m*² dans un anneau dont la section est 25 *cm*² :

1° en acier doux;
2° en fonte.

4. Un anneau en tôle d'acier doux de 28 *cm* de diamètre moyen, de section 2 × 2 *cm*, est recouvert d'un enroulement de 1 600 spires.

Calculer l'intensité du courant qui doit passer dans le bobinage pour obtenir dans une section de l'anneau un flux de 0,6 *milliwéber*.

5. Pour désaimanter un corps sans le chauffer au rouge, par exemple une montre, on le soumet à l'action d'une bobine parcourue par un courant dont on change un grand nombre de fois le sens en diminuant peu à peu l'intensité jusqu'à l'annuler.

Justifier le procédé en figurant la courbe d'aimantation du corps soumis au champ magnétisant de la bobine.

Aimants permanents. Champ magnétique terrestre.

I. Aimants permanents.

1. Réalisation des aimants permanents.

Pour réaliser un aimant, on place le matériau magnétique dans une bobine parcourue par un courant, puis l'on coupe le courant. La substance reste aimantée, mais l'*induction résiduelle n'est pas égale à l'induction rémanente* donnée par le cycle d'hystérésis. En effet, pour tracer ce cycle, nous avons utilisé un noyau en forme d'anneau, dans lequel les courants particulaires d'aimantation ne produisent pas de champ démagnétisant (37e leçon). Il n'en est pas de même avec un aimant de forme quelconque, un barreau par exemple; *les courants particulaires donnent alors naissance à un champ démagnétisant,* auquel des champs magnétiques extérieurs peuvent parfois ajouter leurs effets. Il en résulte des At/m démagnétisants.

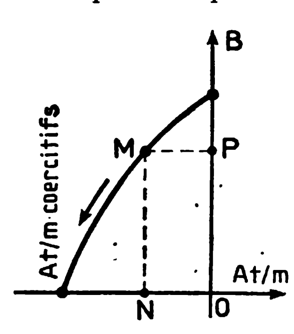


Fig. 1. — ***Courbe de désaimantation*** **d'une substance magnétique.**

Traçons la portion du cycle d'hystérésis correspondant à la désaimantation (fig. 1). L'état magnétique de l'aimant est représenté par le point M, son ordonnée OP représente l'induction résiduelle, son abscisse ON les At/m démagnétisants .

Les *At/m démagnétisants* dépendent de la forme de l'aimant et des actions magnétiques extérieures.

L'*induction résiduelle* dépend des At/m démagnétisants et du matériau choisi.

On montre, par le calcul, que pour créer dans un entrefer donné une induction donnée, le volume de matériau magnétique à utiliser est inversement proportionnel au produit B $\times$ At/m des coordonnées du point de

fonctionnement M. Il en résulte que *pour réaliser un aimant permanent on doit choisir une substance ayant :*

des At/m coercitifs importants;

un produit B × At/m maximum aussi grand que possible.

2. Matériaux par aimants permanents.

Regardons la figure 2, elle représente les courbes de désaimantation de quelques matériaux magnétiques. Nous pouvons y remarquer les propriétés des nouveaux alliages employés pour la construction des aimants : le *ticonal* et les *céramiques ferromagnétiques.*

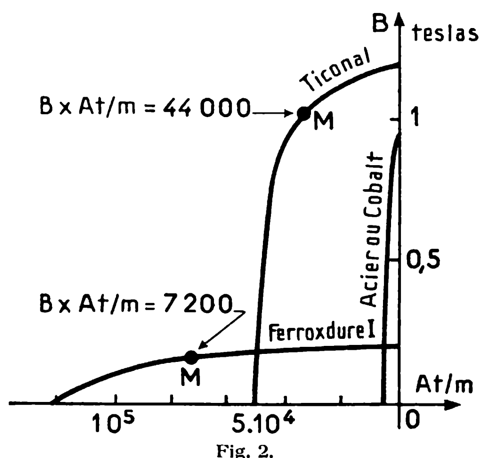


Fig. 2.
Courbes de désaimantation de quelques matériaux.

Le ***Ticonal***, appelé aussi *Alnico V*, est un alliage Fe (51 %), Co (24 %), Ni (14 %), Al (8 %), Cu (3 %). Techniquement difficile à préparer, son prix de revient est assez élevé. Dur et cassant, il est pratiquement impossible à travailler autrement que par meulage. Pour réaliser un aimant de forme donnée, on l'associe à des pièces polaires en acier doux (fig. 3). On l'emploie lorsque une induction magnétique importante est nécessaire : haut-parleurs, appareils de mesures électriques. Son point de fonctionnement optimum M étant proche des At/m coercitifs, toute augmentation de l'entrefer produit une diminution très importante de l'aimantation; un démontage la fait pratiquement disparaître.

Fig. 3. — Réalisation d'un aimant pour appareil de mesures. Des pièces polaires en acier doux sont rapportées sur l'aimant.

Les ***céramiques ferromagnétiques*** sont des *combinaisons d'oxydes* de fer Fe_2O_3 et de baryum BaO. Leurs At/m coercitifs très importants permettent la réalisation d'aimants très stables, même très plats ce qui était impossible avec les autres alliages. Cette qualité, associée à un *faible prix de revient*, explique leurs multiples emplois : fermetures magnétiques de portes, volants et plateaux magnétiques.... Ces céramiques sont vendues sous le nom de « Ferroxdure ».

II. Champ magnétique terrestre.

1. Cherchons la direction du champ magnétique terrestre.

Loin de tout aimant ou de tout courant, une aiguille aimantée s'oriente; il existe donc autour de la Terre un champ magnétique, dit ***champ magnétique terrestre.***

Cherchons à repérer la direction du champ magnétique terrestre en un lieu donné.

1° Déterminons la direction Sud-Nord géographique :

Traçons sur une table horizontale l'*ombre d'un fil à plomb* ***à midi à l'heure solaire.*** Cette ligne est la direction Sud-Nord géographique à l'endroit de l'expérience (fig. 4). La direction Sud-Nord géographique et la verticale au lieu de l'expérience définissent le *plan méridien géographique.*

2° Déclinaison magnétique.

Pour déterminer la *direction du champ magnétique terrestre en un point,* il suffit d'y placer une aiguille aimantée suspendue en son centre de gravité et libre de s'orienter dans toutes les directions (fig. 5).

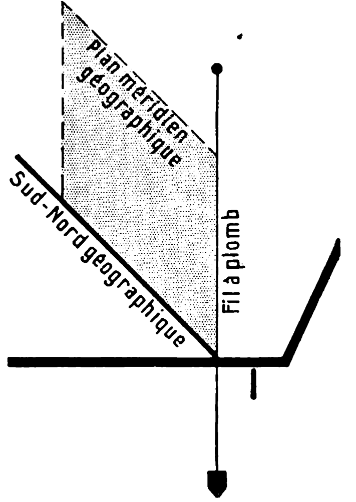


Fig. 4. — L'ombre portée à midi, sur une table horizontale, par un fil à plomb donne la *direction sud-nord géographique.*

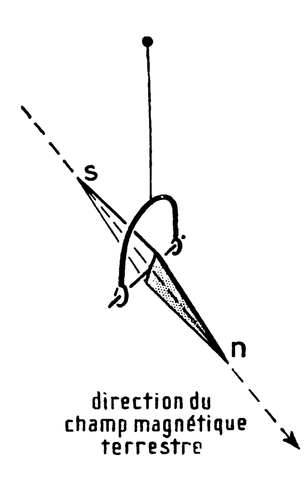


Fig. 5. — L'aiguille aimantée, libre de s'orienter dans toutes les directions, donne la direction du champ magnétique terrestre.

La direction de l'aiguille et la verticale au lieu de l'expérience définissent le *plan méridien magnétique* (fig. 6).

Ce plan n'est pas confondu avec le méridien géographique; l'aiguille aimantée ne donne donc qu'approximativement la direction Sud-Nord.

On appelle ***déclinaison magnétique*** *la mesure de l'angle D des plans méridiens magnétique et géographique.*

La déclinaison est *orientale* si le pôle nord de l'aiguille aimantée est à l'Est du méridien géographique; elle est *occidentale* dans le cas contraire.

Actuellement, à Paris, la déclinaison magnétique est occidentale et vaut environ 7°.

3° *Inclinaison magnétique.*

La pointe nord de l'aiguille aimantée pique vers le sol; le champ magnétique terrestre n'est donc pas horizontal.

Dans le plan méridien magnétique, *la direction du champ magnétique terrestre fait avec une horizontale un angle* I *appelé* ***inclinaison magnétique*** *au lieu de l'expérience.*

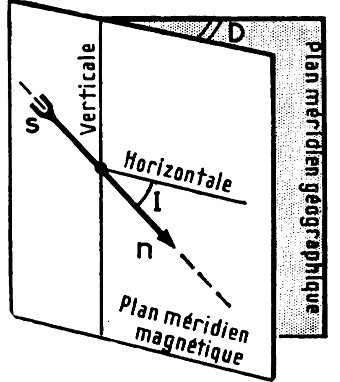


Fig. 6. — La direction du champ magnétique terrestre en un point est définie par la *déclinaison* D et l'*inclinaison* I en ce point.

Actuellement, à Paris, l'inclinaison magnétique est d'environ 64°.

2. Le champ terrestre est uniforme dans une petite région de l'espace.

L'induction magnétique B_t créée par le champ magnétique terrestre est environ 46 *microteslas* ou 0,46 *gauss* à Paris. Cette valeur varie très peu dans un espace de quelques kilomètres.

De même, la déclinaison D et l'inclinaison magnétique I conservent pratiquement les mêmes valeurs si on les mesure en des points peu éloignés.

L'induction magnétique B_t du champ terrestre ayant à peu près même valeur et même direction dans une région assez étendue, ce *champ magnétique* est *pratiquement uniforme* dans cette région.

Les grandeurs B_t, D et I qui déterminent le champ magnétique terrestre dépendent du lieu considéré.

En un lieu donné ces grandeurs varient lentement avec le temps.

En janvier 1935, la déclinaison magnétique était occidentale pour toute la France et valait :

à Strasbourg 7° 6′, à Paris 9° 52′ et à Brest 12° 51′.

En janvier 1955, elle valait :
à Strasbourg 4° 7′, à Paris 6° 51′ et à Brest 9° 50′.
Soit une variation moyenne d'environ 9 *minutes par an.*

3. Composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre.

Dans le plan méridien magnétique, traçons le vecteur $\vec{B}_t$ qui représente l'induction magnétique produite par le champ magnétique terrestre (fig. 7). Projetons ce vecteur sur la verticale et sur l'horizontale passant par son origine, nous obtenons les composantes verticale B_v et horizontale B_h du vecteur $\vec{B}_t$.

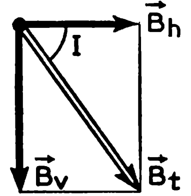


Fig. 7. — La *composante horizontale* B_h *du champ magnétique terrestre* est la projection du vecteur induction $\vec{B}_t$ sur l'horizontale.

Ce sont les *composantes du champ magnétique terrestre.* Actuellement, à Paris, la composante horizontale B_h vaut environ :

$$B_h = B_t \cos I = 46.10^{-6}.\cos 64°.$$

$$\simeq 20 \textit{ microteslas} \text{ ou } 0{,}2 \textit{ gauss.}$$

Les aiguilles aimantées montées sur pivot sont lestées de façon à rester horizontales, sous l'action du champ magnétique terrestre (fig. 8). L'axe de rotation ne passe pas par le centre de gravité. Elles ne sont sensibles qu'à la composante horizontale B_h du champ terrestre.

4. La boussole.

Une boussole est une aiguille aimantée placée sur un pivot vertical et mobile, dans un plan horizontal, devant un cercle gradué.

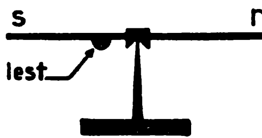


Fig. 8. — Cette aiguille aimantée de boussole reste dans un plan horizontal grâce à la petite surcharge placée du côté du pôle sud. Elle s'oriente sous l'action de la *composante horizontale* du champ magnétique terrestre.

Elle permet, connaissant la déclinaison du lieu où l'on se trouve, de déterminer à toute heure du jour ou de la nuit la direction Sud-Nord géographique.

Elle donne ainsi aux marins ou aux aviateurs, quand ils ont fait le *point*, c'est-à-dire trouvé la position de leur vaisseau en longitude et latitude, de fixer la direction qu'ils doivent suivre pour atteindre le but de leur voyage.

Dans une forêt, un promeneur peut l'utiliser pour fixer approximativement sa direction de marche et éviter de se perdre.

Résumé.

1. — Pour réaliser un *aimant permanent*, il faut utiliser une substance ayant des At/m cœrectifs importants.

Les matériaux les plus employés sont les aciers très durs, les aciers au cobalt, les alliages complexes type « Ticonal », les céramiques ferromagnétiques.

2. — Une aiguille aimantée éloignée de tout aimant et de tout courant s'oriente dans la direction du *champ magnétique terrestre*.

Dans nos régions, l'aiguille pointe son pôle nord vers le sol, l'angle de son axe avec l'horizontale est l'*inclinaison* I (environ 60°). Le plan vertical dans lequel elle se place est le plan méridien magnétique, il fait avec le plan méridien géographique un angle D appelé *déclinaison magnétique*.

3. — Le champ magnétique terrestre est uniforme dans une petite région de l'espace.

Exercices.

1. Un conducteur rectiligne horizontal est placé au-dessus d'une aiguille aimantée. Comment faut-il orienter le conducteur pour que l'aiguille ne bouge pas au moment où l'on fait passer le courant dans le conducteur.

2. Une bobine plate circulaire de 10 *cm* de rayon comporte 100 spires constituées par du fil de cuivre de diamètre 0,1 *mm* et de résistivité 1,7 μΩ.*cm*; son plan coïncide avec le méridien magnétique.

Une aiguille aimantée horizontale mobile autour d'un axe vertical est placée au centre de la bobine.

Comment l'aiguille est-elle orientée lorsqu'il n'y a pas de courant dans la bobine?

Quelle doit-être la d. d. p. aux bornes de la bobine pour que l'aiguille tourne de 45° lorsqu'on alimente la bobine.

Composante horizontale du champ terrestre : 20 *microteslas.*

3. Déterminer la valeur de l'induction magnétique du champ terrestre en un point où l'inclinaison magnétique est 64° 15′ et la composante horizontale du champ terrestre est 20,1 *microteslas.*

4. Comment, à l'aide d'une boussole, pouvez-vous orienter une carte. Faites un croquis expliquant la méthode que vous employez.

10. — ACTION DES CHAMPS MAGNÉTIQUES SUR LES COURANTS

40e LEÇON

Force produite par l'action d'un champ sur un courant.

1. Les forces électromagnétiques.

Nous savons déjà qu'un conducteur parcouru par un courant est soumis à une force lorsqu'il est placé dans un champ magnétique.

Pour rappeler l'origine de cette force, on l'appelle ***force électromagnétique.*** Nous nous proposons d'étudier les divers éléments qui caractérisent cette force : direction, sens et intensité. Pour cela nous utiliserons à nouveau un conducteur rectiligne suspendu librement par deux conducteurs très souples, et nous ferons agir sur lui le champ magnétique uniforme produit entre ses branches par un aimant en U.

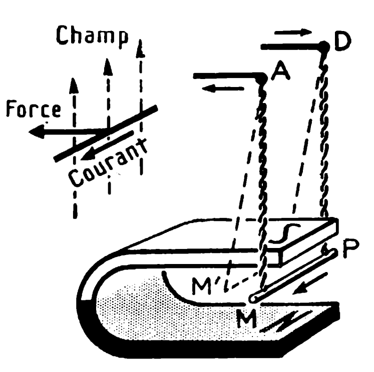


Fig. 1. — Lorsqu'on fait passer un courant dans le conducteur MP, il se déplace vers la gauche en M'P'.

2. Direction et sens de la force électromagnétique.

Expériences. — a) Disposons l'aimant pour que ses deux branches embrassent le conducteur MP comme l'indique la figure 1 : les lignes d'induction de l'aimant sont verticales et perpendiculaires au conducteur.

Faisons passer un courant dans le conducteur de P vers M, il se

déplace vers la gauche en M′P′. Il n'a aucune tendance à glisser dans la direction MP : il se déplace en fauchant les lignes d'induction. C'est

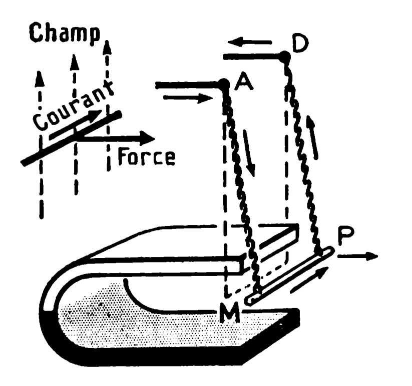


Fig. 2. — ***Le sens du courant est inversé*** : MP se déplace vers la droite.

Fig. 3. — Comparez à la figure 1. En inversant le sens du champ magnétique on inverse le sens de la force électromagnétique.

qu'il est soumis à *une force F perpendiculaire au plan défini par le conducteur et le vecteur induction.*

b) Inversons le sens du courant : MP se déplace vers la droite (fig. 2). La force électromagnétique a changé de sens.

c) Il en est de même si on retourne l'aimant, donc si l'on inverse le sens du champ magnétique (fig. 3).

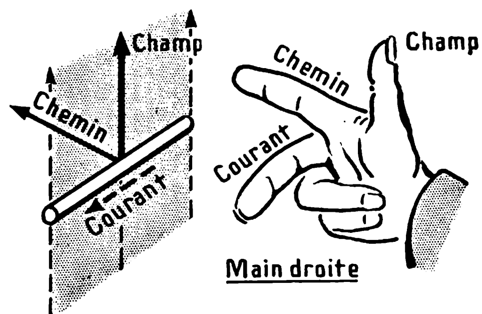


Fig. 4. — La ***règle des trois doigts de la main droite*** permet de trouver le sens de la force électromagnétique.

Concluons :

La force électromagnétique est normale au plan défini par la direction du courant et le vecteur induction magnétique; son sens dépend du sens du courant et de celui du champ.

La ***règle des trois doigts de la main droite*** est un moyen pratique de déterminer ce sens :

Le pouce, l'index et le majeur de la main droite sont disposés comme les arêtes d'un cube aboutissant au même sommet (fig. 4).

On place :
*le **pouce** dans la direction et le sens du **champ;***
*le **majeur** dans la direction et le sens du **courant;***
*l'**index** indique la direction et le sens de la **force électromagnétique** ou du chemin suivi par le conducteur.*

Main Droite, parce qu'il s'agit de ***Déplacer*** un conducteur

pouce	***index***	***majeur***	(*ordre naturel des doigts*)
↓	↓	↓	
champ	**chemin**	**courant**	(*ordre alphabétique*)

Il existe d'autres façons équivalentes de retrouver ce sens.

3. Quels sont les facteurs dont dépend l'intensité de la force électromagnétique ?

Reprenons le dispositif expérimental du paragraphe précédent et cherchons quels sont les facteurs qui modifient la force électromagnétique.

Expériences. — ***a)*** Augmentons l'intensité du courant dans BC : le déplacement du conducteur est plus important.

Diminuons l'intensité : le déplacement est moindre.

L'intensité de la force électromagnétique dépend de l'intensité du courant.

b) Plaçons maintenant deux aimants identiques l'un à côté de l'autre : la longueur du conducteur soumise à l'action du champ magnétique, donc sa longueur active, augmente : la force croît.

La force électromagnétique dépend de la longueur active du conducteur.

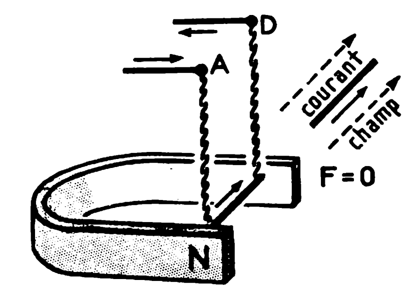


Fig. 5. — Le champ et le courant sont parallèles : la force électromagnétique est nulle.

c) Remplaçons l'aimant par un autre de mêmes dimensions mais récemment aimanté donnant une induction plus grande : le déplacement de BC est plus important.

L'intensité de la force électromagnétique dépend de la valeur de l'induction magnétique.

d) Inclinons l'aimant pour que les lignes de force du champ soient obliques par rapport au courant : la force diminue. Elle est nulle si le vecteur induction et le courant sont parallèles (fig. 5).

La force électromagnétique dépend de l'angle des lignes d'induction et du conducteur.

4. Formule de Laplace.

Des expériences quantitatives montrent que ***la force électromagnétique est proportionnelle :***

à l'intensité du courant I dans le conducteur,

à l'induction magnétique B,

à la longueur l du conducteur sur laquelle agit le champ magnétique,

au sinus de l'angle α que fait le courant avec le vecteur induction.

Cette force est donnée par la *formule de Laplace* :

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha$$

newtons — teslas — ampères — mètres

L'intensité de cette force est maximum lorsque le courant et l'induction sont perpendiculaires ($\alpha = 90°$), elle s'annule lorsque le courant et l'induction sont parallèles ($\alpha = 0$).

Exemple. Dans une des expériences du paragraphe 3, l'intensité $I = 10$ *A*, l'induction $B = 0,02$ *tesla*, la longueur $l = 5$ *cm*; le courant et l'induction sont perpendiculaires $\alpha = 90°$. On a :

$F = 0,02 \times 10 \times 0,05 = 0,01$ *newton;* soit environ 1 *gramme-force*.

Remarquons que $B \sin\alpha$ représente la projection B_n du vecteur $\vec{B}$ sur un plan normal au conducteur. On peut alors écrire la formule de Laplace (fig. 6) :

$$F = B_n I l.$$

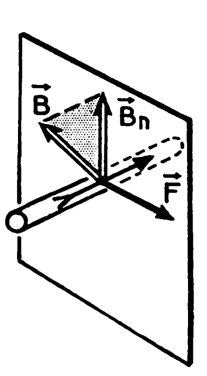


Fig. 6. — Lorsque le champ et le courant ne sont pas perpendiculaires, tout se passe comme si c'était la *composante normale* B_n de l'induction qui agissait.

5. Action mécanique entre deux conducteurs rectilignes.

Soient deux conducteurs rectilignes très longs parallèles séparés par la distance a, ils sont parcourus par des courants, de même sens, d'intensité I_1 et I_2 (fig. 7).

Considérons un tronçon PQ de longueur l du conducteur (2); il est placé dans le champ magnétique produit par le courant I_1; il est donc soumis à une force.

En chaque point de (2), l'induction créé par (1) a même direction et même valeur; tout se passe comme si (2) était dans un champ uniforme.

Dans l'air, l'induction en un point de (2) est : $B = 2.10^{-7}\frac{I_1}{a}$; le vecteur $\vec{B}$ est normal au plan défini par les deux conducteurs. La force F, agissant sur le tronçon PQ est donc dirigée suivant O_1O_2 dans le plan des conducteurs; son intensité est :

$$F = B\, I_2\, l = 2.10^{-7}\, I_1\, I_2\, \frac{l}{a}.$$

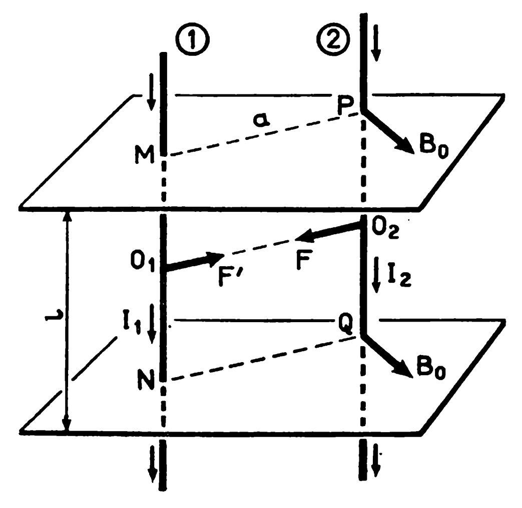


Fig. 7. — Actions mutuelles de deux courants parallèles.

On peut calculer de même la force F′ agissant sur le tronçon MN de longueur *l* du conducteur (1) : elle est égale et opposée à F. On peut donc conclure : deux courants parallèles, très longs, de même sens s'attirent avec une *force* dite *électrodynamique* :

$$\underset{\text{newtons}}{F} = \frac{2}{10^7} \underset{\text{ampères}}{I_1 I_2} \frac{l}{a} \text{ mètres}$$

En procédant comme ci-dessus, vous montrerez facilement que *deux courants parallèles de sens contraires se repoussent.*

Ces résultats confirment l'étude expérimentale faite à la 6e leçon. Ils ont servi à la ***définition de l'ampère.***

Résumé.

1. — **Quand un conducteur de longueur *l mètres*, parcouru par un courant d'intensité I *ampères*, est soumis à un champ magnétique uniforme dont la composante normale de l'induction est B_n *teslas*, il subit l'action d'une force F *newtons* dont la valeur est donnée par la formule de Laplace :**

$$F = B_n I l.$$

2. — **Cette force est normale au plan induction-courant ; sa direction et son sens sont donnés par la règle des trois doigts de la main droite (*D*roite → *D*éplacer un conducteur) :**

pouce	index	majeur
↓	↓	↓
champ	chemin	courant

Exercices.

1. Un conducteur parcouru par un courant de 100 *A* est tendu horizontalement. L'induction magnétique terrestre a, dans la région où se trouve le conducteur, pour composante horizontale 2.10^{-5} *Wb/m²* et pour composante verticale 4.10^{-5} *Wb/m²*. Calculer la force qui s'exerce sur 1 *mètre* de ce conducteur lorsqu'il est :

a) parallèle au plan méridien magnétique terrestre;

b) perpendiculaire à ce plan.

2. Une balance, dite ***balance de Cotton*** (fig. 8), comporte, à une extrémité du fléau un circuit formé de deux conducteurs AM et CN en arcs de cercles de centre O, axe de la balance. L'élément MN de longueur 4 *cm* est placé dans un champ magnétique normalement aux lignes d'induction. Lorsque la balance est en équilibre MN est horizontal. Les deux bras de la balance sont égaux, elle est en équilibre lorsque le courant dans le conducteur MN est nul.

On fait passer un courant de 10 *A* dans MN, pour rétablir l'équilibre il faut placer une masse marquée de 30 g dans le plateau.

a) Calculer la valeur de l'induction magnétique.

b) Expliquer pour quelles raisons les conducteurs AM et CN ont la forme d'arcs de cercles de centre O.

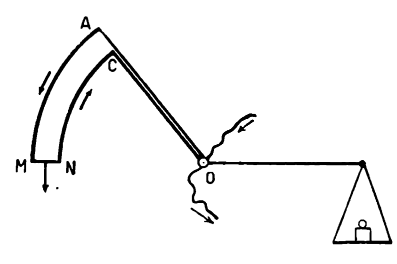


Fig. 8. — Schéma d'une balance de Cotton.

3. Un cadre rectangulaire MNPQ est parcouru par un courant de 50 *A*; il est placé dans un champ uniforme d'induction 0,01 *tesla*. Les côtés MN et PQ sont parallèles aux lignes d'induction, les côtés NP et MQ sont normaux à ces lignes.

Déterminer les forces auxquelles sont soumis les quatre côtés du cadre. On a :

$$MN = PQ = 10\ cm, \quad NP = MQ = 8\ cm.$$

4. Trois conducteurs parallèles, très longs, sont dans un même plan à des distances de 10 cm. Les conducteurs extrêmes sont parcourus par des courants de 50 A et 100 A dans la même direction. Le retour s'effectue par le conducteur central. Déterminer les forces qui agissent sur une longueur de 1 *mètre* de chaque conducteur.

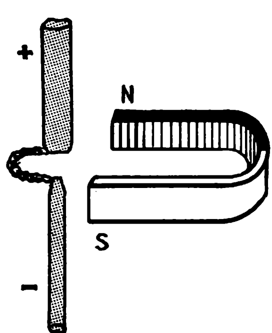


Fig. 9. — Le champ de l'aimant souffle l'arc électrique, ce qui prouve que les forces électromagnétiques s'exercent quelle que soit la température, et quelle que soit la nature du conducteur.

5. Le champ de l'aimant repousse l'arc électrique (fig. 9), et le souffle. En considérant que l'arc est un courant qui passe dans l'air et qui, par suite, est mobile, expliquez pourquoi l'arc est repoussé.

Qu'arriverait-il si l'on retournait l'aimant pôle pour pôle?

6. Un fil de cuivre BC, rectiligne et rigide, de longueur 10 *cm* et de diamètre 1,5 *mm*, est suspendu par deux fils conducteurs AB et CD, infiniment flexibles, de longueur 1 *m* et de masse négligeable (*fig.* 10). On fait passer un courant dans le sens ABCD.

Un aimant en fer à cheval crée entre ses branches un champ uniforme d'inductoin 0,04 Wb/m^2 que l'on supposera brusquement limité à une largeur de 4 *cm* dans la direction perpendiculaire au plan du fer à cheval.

1° Indiquer clairement, en s'aidant d'un croquis, comment il faut placer l'aimant pour que BC puisse être soulevé par une force électromagnétique verticale. Calculer l'intensité minimum du courant pour que ce soulèvement ait lieu.

2° Indiquer de la même façon comment il faut placer l'aimant pour que BC s'écarte

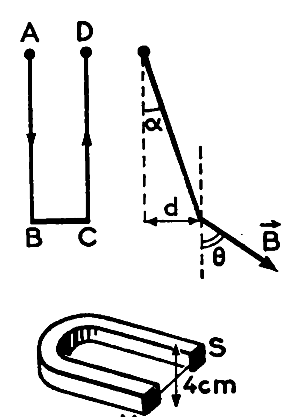


Fig. 10. — Exercice n° 5.

d'un angle α du plan vertical ABCD sous l'action d'une force électromagnétique perpendiculaire à ce plan. L'intensité du courant étant 0,1 A, calculer le déplacement d de BC.

3° Indiquer enfin comment il faut placer l'aimant pour que BC ne subisse aucune action.

4° On donne à l'aimant une position telle que l'induction B reste perpendiculaire à BC mais soit incliné de l'angle θ sur la verticale. Établir la formule générale donnant tg α en fonction de θ.

5° On éloigne l'aimant et l'on oriente BC dans le plan du méridien magnétique. Montrer que ce fil peut se déplacer. Calculer l'intensité du courant lorsque ce déplacement, est égal à 1 *mm.*

Masse volumique du cuivre : 8,85 g/cm^3;

Composante horizontale de l'induction magnétique terrestre :

$$0{,}2.10^{-4}\ Wb/m^2;$$

Inclinaison : 64° 45'. (Baccalauréat).

Travail des forces électromagnétiques.

1. Calculons le travail effectué par la force électromagnétique lorsqu'un conducteur se déplace.

Réalisons le montage schématisé par la figure 1. Deux rails horizontaux R_1 et R_2 sont reliés par une tige cylindrique MP de longueur l normale aux deux rails et pouvant rouler sur eux.

L'ensemble fait partie d'un circuit tel que MP soit parcouru de M vers P par un courant d'intensité I.

Un aimant, non figuré, produit autour de MP un *champ magnétique uniforme* vertical d'induction B.

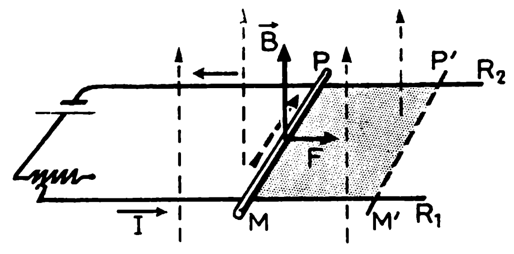


Fig. 1. — La force électromagnétique F, en déplaçant la barre de MP en M′P′, produit un travail mécanique.

Le conducteur est soumis à une force électromagnétique $F = BI\,l$ *newtons;* lorsqu'il se déplace de d mètres de MP en M′P′, cette force produit un travail : $W = BI\,l\,d$ *joules.*

Dans son déplacement le conducteur balaie la surface $S = ld$ du rectangle MPM′P′, donc :

$$W = IBS \text{ joules.}$$

Mais BS, produit de l'induction magnétique par la surface du rectangle, est le flux Φ à travers le rectangle, ***flux balayé ou coupé*** par le conducteur pendant son déplacement, d'où :

$$\underset{\text{joules}}{W} = \underset{\text{ampères}}{I}\ \underset{\text{webers}}{\Phi}$$

Le travail effectué par la force électromagnétique qui agit sur un conducteur mobile est proportionnel à l'intensité du courant et au flux coupé par le conducteur pendant son déplacement.

2. Travail des forces électromagnétiques agissant sur un circuit.

Considérons non plus seulement le conducteur MP, mais *tout le circuit* dont il fait partie.

Lorsque le conducteur est en MP (fig. 2 *a*), le flux d'induction à travers le circuit a une certaine valeur Φ_1. Quand le conducteur est en M'P' (fig. 2*b*), le flux a la valeur Φ_2.

Si nous appelons *variation de flux* $\Delta\,\Phi$ (se lit *delta phi*) la valeur finale Φ_2 diminuée de la valeur initiale Φ_1, on peut dire que pendant le déplacement

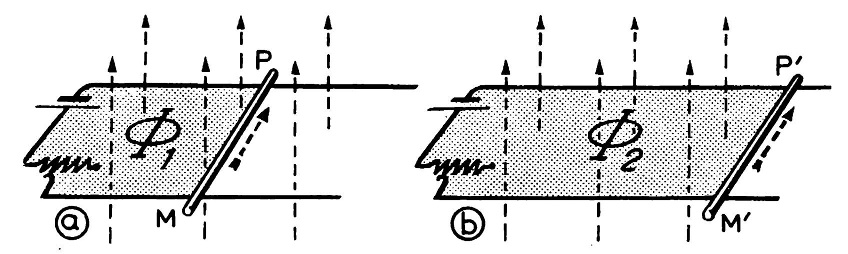


Fig. 2. — Dans le déplacement de MP à M'P' le flux à travers le circuit s'accroît de $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$, c'est aussi le flux coupé par MP pendant le déplacement.

du conducteur de MP en M'P' la variation de flux à travers le circuit est $\Phi_2 - \Phi_1$.

Cette variation représente précisément le flux Φ coupé par MP pendant le déplacement; donc :

$$\underset{joules}{W} = \underset{ampères}{I}\ \underset{webers}{(\Phi_2 - \Phi_1)} = \underset{ampères}{I} \times \underset{webers}{\Delta\,\Phi} \qquad (1)$$

Le travail effectué par les forces électromagnétiques pendant le déplacement d'un circuit fermé est proportionnel à l'intensité du courant et à la variation du flux d'induction magnétique à travers le circuit.

Cette loi, établie dans un cas particulier, est générale.

3. Le travail des forces électromagnétiques est moteur ou résistant.

Quand le conducteur mobile se déplace dans le sens de la force électromagnétique, le travail de cette force est *moteur*.

Mais le déplacement peut avoir lieu en sens opposé, d'autres forces agissant sur le conducteur : par exemple, dans le cas étudié à la figure 1, l'expérimentateur peut ramener à la main le conducteur de M'P' en MP; le travail de la force électromagnétique est alors *résistant*.

Comment la formule (1) peut-elle nous apprendre si le travail W est moteur ou résistant?

Dans le cas de la figure 2, les flux Φ_1 et Φ_2 à travers le circuit sont de même sens que le flux créé par le courant I : ils pénètrent dans le circuit par sa face sud, d'après nos conventions ils sont *positifs*. La force électromagnétique F produit un *travail moteur;* la valeur absolue du flux croît, sa variation $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ est *positive*, la formule (1) donne pour W une valeur positive.

Si le déplacement se produisait de M'P' à MP, le travail serait *résistant*, $\Delta \Phi$ serait *négatif;* la formule (1) donnerait pour W une valeur négative.

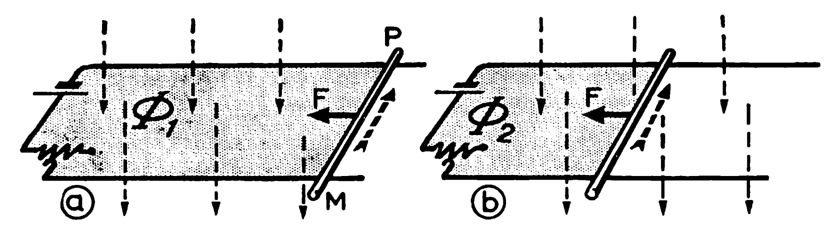


Fig. 3. — La force électromagnétique F produit, dans le déplacement de MP à M'P', un *travail moteur*.
Le flux, entrant par la face nord du circuit, est négatif; la *variation de flux* $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ est *positive*.

Inversons le sens du champ magnétique (fig. 3), *le flux* créé par ce champ à travers le circuit *entre par la face nord :* d'après nos conventions il est *négatif*.

Un travail moteur de la force F correspond à une diminution de la valeur absolue du flux à travers le circuit, donc à une augmentation de sa valeur algébrique; la variation de flux $\Delta \Phi$ est positive et la formule (1) donne encore pour W une valeur positive.

Compte tenu de la convention de signes adoptée pour le flux :

flux positif quand il entre par la face sud du circuit, et en adoptant pour le travail mécanique la convention :

travail moteur positif,
travail résistant négatif,

la formule $W = I(\Phi_2 - \Phi_1)$ est *algébrique*. Elle permet de déterminer la nature du travail W, donc, si le sens du déplacement est connu, le sens de la force électromagnétique F.

4. Règle du flux maximum.

Lorsqu'un circuit *se déplace* ou *se déforme spontanément* sous l'action des forces électromagnétiques, celles-ci effectuent un travail moteur.

Nous avons vu qu'un travail moteur correspond toujours à une aug-

mentation de la valeur algébrique du flux à travers le circuit; notre démonstration n'a été faite que dans des cas particuliers simples. Maxwell a établi la loi générale suivante :

Un circuit parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tend à se déplacer ou à se déformer de façon à augmenter le flux d'induction magnétique qui entre par sa face sud.

Si pour une position ce flux est maximum, à partir de cette position la variation de flux est toujours négative. Pour tout déplacement les forces électromagnétiques effectuent un travail résistant, elles ramènent le circuit dans la position de flux maximum.

Cette position est une *position d'équilibre stable,* d'où la règle du flux maximum :

Sous l'action des forces électromagnétiques, un circuit s'oriente de façon que le flux qui entre par sa face sud soit maximum.

5. Appliquons la règle du flux maximum.

Expérience. — 1. On approche le pôle nord d'un aimant de la face sud d'une bobine légère suspendue par deux fils longs et souples (fig. 4) : la bobine est attirée.

Le flux produit par l'aimant à travers la bobine est positif, lorsque

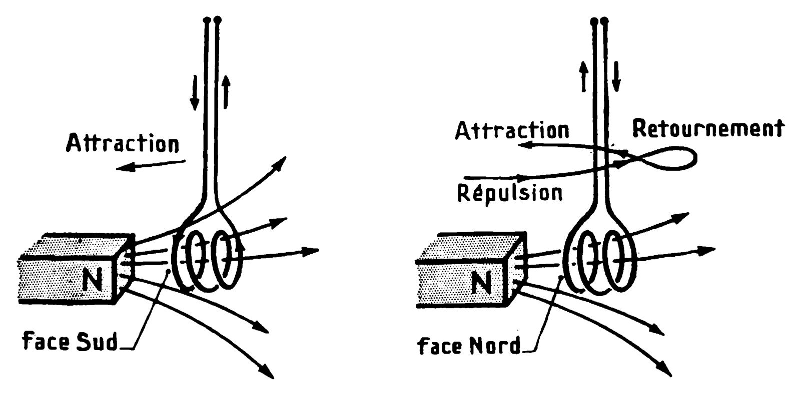


Fig. 4. — La bobine est attirée par l'aimant; le flux à travers sa face sud croît.

Fig. 5. — La bobine est repoussée par l'aimant, elle se retourne, puis elle est attirée.

la bobine s'approche du pôle nord de l'aimant le flux entrant par sa face sud augmente.

2. *Inversons le courant* dans la bobine : la bobine est repoussée, elle se retourne et est alors attirée vers l'aimant (fig. 5).

Le flux magnétique produit par l'aimant sort par la face sud de la bobine, il est *négatif*. Lorsque la bobine s'éloigne de l'aimant, le flux diminue en valeur absolue; le déplacement correspond encore à une augmentation de la valeur algébrique du flux. Après retournement, tout se passe comme en 1.

6. Un cadre placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à un couple.

Expériences. — Une bobine plate formée de plusieurs spires rectangulaire est un *cadre.*

Plaçons une telle bobine dans un champ magnétique uniforme de façon que les lignes d'induction soient parallèles au plan du cadre (fig. 6).

Un courant d'environ 1 *ampère* circule dans le cadre qui tourne et se place perpendiculairement aux lignes d'induction, de façon que celles-ci entrent par la face sud du cadre.

La position d'équilibre est celle correspondant au flux maximum.

Calculons la valeur du couple qui agit sur le cadre lorsque la normale au plan d'une spire fait un angle α avec le vecteur induction (fig. 7). Pour cela, appliquons la loi de Laplace à chacun des éléments rectilignes qui forment une spire.

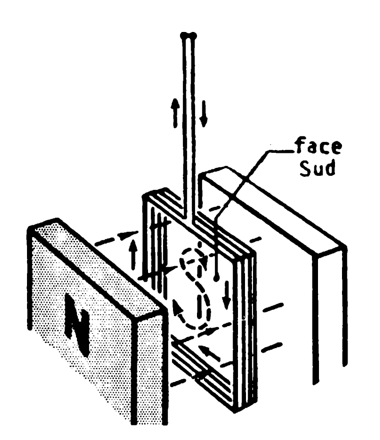


Fig. 6. — Un cadre est formé par un certain nombre de spires rectangulaires parcourues par un même courant.

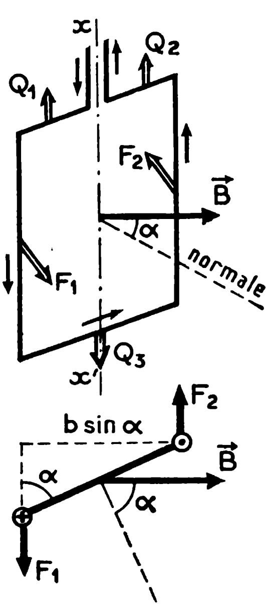


Fig. 7. — Les forces F_1 et F_2 forment un couple. Les forces $Q_1Q_2Q_3$ sont sans action sur le mouvement du cadre autour de l'axe $x'x$.

Les côtés verticaux, de longueur ***a***, sont soumis à des forces horizontales F_1 et F_2 qui forment un couple.

Les côtés horizontaux, de longueur ***l***, sont soumis à des forces verticales qui tendent à déformer le cadre. Leur action est nulle pour les rotations autour de l'axe $x'x$.

Une spire est donc soumise à un couple de moment :

$M_1 = F_1 \times$ bras de levier, soit $M_1 = BI\,a \times l \sin \alpha$.

Le produit $a \times l$ représente la surface S d'une spire, donc

$$M_1 = BIS \sin \alpha.$$

Si le cadre comprend N spires, il est soumis à un *couple électromagnétique* de moment :

$$\underset{\text{mètres-newtons}}{M} = NM_1 = NBIS \sin \alpha.$$

Ce couple dépend de l'orientation du cadre dans le champ magnétique. Il est maximum si $\alpha = 90°$, donc lorsque le vecteur induction est dans le plan d'une spire; il est nul si $\alpha = 0$, c'est-à-dire lorsque le cadre est perpendiculaire au vecteur induction.

Le champ magnétique peut être produit par une bobine parcourue par un courant I_1; placé dans ce champ un cadre parcouru par un courant I_2 est soumis à un *couple électrodynamique* proportionnel au produit des intensités des courants : $M = KI_1I_2$.

Résumé.

1. — Lorsqu'un circuit, parcouru par un courant d'intensité I ampères, se déplace ou se déforme dans un champ magnétique, le travail des forces électromagnétiques est :

$$W = I \times \Delta\Phi \text{ joules.}$$

$\Delta\Phi$ en webers désignant la variation du flux à travers le circuit; cette variation est égale aussi au flux coupé par le circuit pendant son mouvement.
Ce travail est moteur ou résistant.

2. — Un circuit parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tend à se déplacer ou à se déformer de façon à augmenter le flux magnétique qui entre par sa face sud.

3. — Un cadre placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à un couple proportionnel à l'intensité du courant qui le parcourt.

Exercices.

1. Sur deux conducteurs rectilignes parallèles situés dans un plan horizontal peut rouler une tige conductrice MP qui leur est perpendiculaire (fig. 3). L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme vertical d'induction 0,2 *tesla*, dirigée vers le bas. Les extrémités des conducteurs sont réunies à une batterie d'accumulateurs de f. é. m.

12 *volts*, la résistance de circuit est 0,5 Ω. La distance entre les deux conducteurs parallèles est 15 *cm*. Calculer le travail de la force électromagnétique lorsque la tige MP se déplace de 20 *cm* sous l'action de cette force.

2. Dans un moteur électrique, sur l'induit mobile, à une distance de l'axe de 8 *cm* se trouvent 672 conducteurs, longs de 10,5 *cm* et parcourus par un courant de 8,25 *A*. Les 2/3 de ces conducteurs sont toujours placés sous les pôles d'un électro-aimant, normalement aux lignes d'induction. L'induction dans l'entrefer est 1 Wb/m^2. Les courants dans les conducteurs ont des sens tels que toutes les forces électromagnétiques produisent des actions de même sens autour de l'axe.

1° Quelle est la force qui agit sur un conducteur? Quel est le moment de cette force par rapport à l'axe?

2° Quelle est le moment du couple moteur? Quelle est la puissance du moteur lorsqu'il tourne à raison de 1 500 *tr/mn?*

3. Un conducteur rectiligne AOC peut tourner autour d'un axe vertical passant par O (milieu de AC) (fig. 8). Il communique électriquement par des galets avec un chemin de roulement circulaire horizontal de résistance négligeable et de diamètre 40 *cm*. On branche une batterie d'accumulateurs de f. é. m. 24 *volts* et de résistance 0,1 ohm entre le point O et le chemin de roulement.

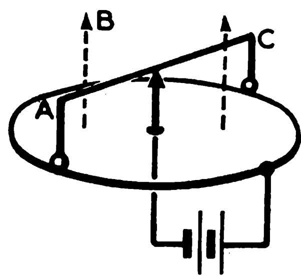


Fig. 8. — Le conducteur AC est mobile autour d'un axe vertical passant par O.

Le conducteur AC est homogène, il a une résistance de 0,8 *ohm*.

L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme vertical dirigé de bas en haut d'induction 0,04 *tesla*. Calculer

1° l'intensité des courants dans le conducteur AOC;

2° le couple électromagnétique s'exerçant sur l'équipage mobile;

3° la puissance fournie par les forces électromagnétiques lorsque le système tourne à la vitesse constante de 30 *tr/mn*.

4. Un cadre rectangulaire comprend 20 spires de 20 *cm* × 10 *cm*. Il est placé dans un champ magnétique uniforme dont les lignes d'induction sont perpendiculaires au plan d'une spire; l'induction B est égale à 0,03 Wb/m^2. Le courant dans le cadre est de 1 *ampère*.

Le cadre effectue un déplacement de translation de longueur $l = 10$ *cm*,

a) dans son plan, ses côtés restant parallèles à eux-mêmes;

b) parallèlement aux lignes d'induction.

Calculer dans chaque cas le travail effectué par les forces électromagnétiques.

Justifier votre résultat en considérant le travail des forces agissant sur chacun des côtés du cadre.

II. - PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

42e LEÇON

F. é. m. induite dans un conducteur mobile

1. Déplaçons un conducteur dans un champ magnétique.

Expériences. — Déplaçons un conducteur rectiligne MP d'un mouvement de translation dans un champ magnétique uniforme; ses deux extrémités M et P sont réunies à un galvanomètre ou mieux à un millivoltmètre à zéro central (fig. 1).

a) Déplaçons le conducteur dans un plan perpendiculaire aux lignes d'induction : l'appareil de mesure dévie, il indique une d. d. p. entre M et P.

b) Déplaçons le conducteur dans un plan parallèle aux lignes d'induction, il ne coupe pas ces lignes : l'appareil de mesure ne dévie pas.

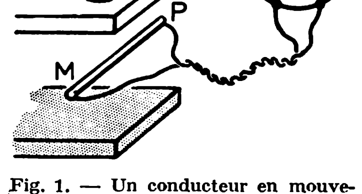


Fig. 1. — Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique est le siège d'une f. é. m.

c) Nous faisons des observations identiques en déplaçant la source de champ magnétique, un aimant, au lieu du conducteur.

Un conducteur est le siège d'une f. é. m. lorsqu'il coupe les lignes d'induction d'un champ magnétique.

C'est un ***phénomène d'induction électromagnétique***, la f. é. m. est dite *force électromotrice induite.*

La source du champ magnétique, aimant ou bobine, est l'***inducteur.***

Le conducteur MP, siège d'un *phénomène d'induction*, est l'***induit.*** La portion de ce conducteur qui coupe les lignes d'induction est sa *partie active.*

2. Sens de la f. é. m. induite.

Expériences. — Les lignes d'induction du champ magnétique étant verticales dirigées de bas en haut, déplaçons MP vers la droite : le voltmètre dévie (fig. 2).

Déplaçons MP vers la gauche : le voltmètre dévie en sens inverse.

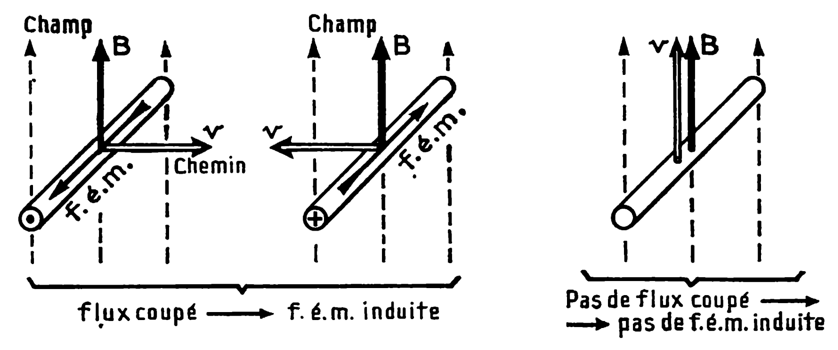


Fig. 2. — Une force électromotrice est induite dans le conducteur s'il y a *flux coupé.*

Inversons le sens du champ magnétique; pour un déplacement de sens donné, le sens de la f. é. m. s'inverse par rapport aux expériences précédentes.

Le ***sens de la f. é. m. induite*** dépend des sens de l'induction magnétique et du déplacement. Il est facile à trouver par ***la règle des***

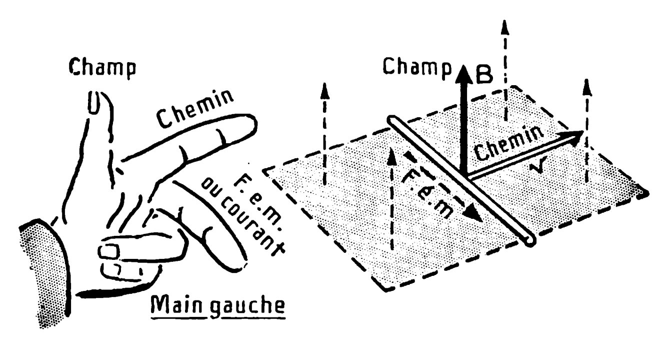


Fig. 3. — *Règle des trois doigts de la main gauche.*

trois doigts de la main gauche : *le pouce, l'index et le majeur de la main gauche sont disposés comme les arêtes d'un cube aboutissant au même sommet* (fig. 3); *on place le* **pouce** *dans la direction et le sens du*

***champ, l'index** dans la direction et le sens du **chemin** parcouru par le conducteur, le **majeur** indique le sens du **courant** que produirait dans un circuit la f. é. m. induite.*

Pour retenir cette règle : main ***Gauche***, parce qu'il s'agit d'un ***Générateur***,

pouce ↓ ***champ***	***index*** ↓ ***chemin***	***majeur*** ↓ ***courant*** ou ***f. é. m.***	*(ordre naturel des doigts)* *(ordre alphabétique)*

3. Valeur de la f. é. m. induite.

L'expérience montre que la f. é. m. induite est, lorsque le déplacement s'effectue uniformément dans un plan perpendiculaire aux lignes d'induction :

a) proportionnelle à la longueur active du conducteur l;

b) proportionnelle à l'induction magnétique B;

c) proportionnelle à la vitesse v de déplacement du conducteur.

Elle est donnée par la formule :

$$\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{v}$$

volts — teslas — mètres — m/s

Si le déplacement s'effectue dans un plan oblique par rapport aux lignes d'induction, on a :

$$\mathbf{E} = \mathbf{B}_n \times \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{v}.$$

B_n désignant la *projection du vecteur induction* sur une normale au plan dans lequel le conducteur se déplace (fig. 4).

Jusqu'ici nous avons supposé que la vitesse du conducteur était constante et le champ magnétique uniforme, mais les valeurs de B_n et de v peuvent varier à chaque instant : *la f. é. m. induite est variable.*

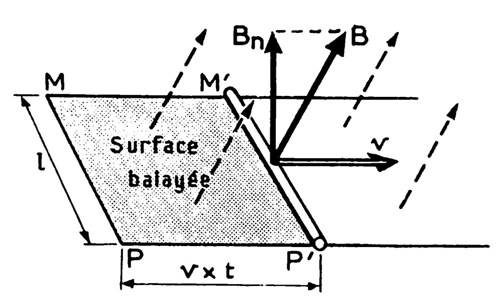


Fig. 4. — Si le déplacement s'effectue dans un plan oblique par rapport aux lignes d'induction, tout se passe comme si l'induction était remplacée par sa *composante normale* B_n.

La formule $e = B_n \, l \, v$ nous donne sa valeur à un instant donné.

4. Loi du flux coupé.

Lorsque le conducteur se déplace pendant le temps t de MP à M'P', il balaie pendant son déplacement une surface $l \times v \times t$, à travers laquelle le flux d'induction est $\Phi = B_n \times l \times v \times t$.

La f. é. m. induite vaut donc :

$$E = B_n \times l \times v = \frac{\Phi \text{ webers}}{t \text{ secondes}}$$

Φ désignant le ***flux balayé ou coupé*** par le conducteur pendant le temps t.

Lorsque la vitesse du conducteur est variable, la relation $E = \Phi : t$ nous donne la *valeur moyenne* de la force électromotrice induite pendant le temps t.

Entre les instants très proches t et $t + \Delta t$, tout se passe comme si le flux d'induction balayé ΔΦ l'était à vitesse constante, on peut dire que la *f. é. m. induite* ***e*** *à l'instant t* est :

$$\underset{\text{volts}}{e} = \frac{\Delta\Phi \text{ webers}}{\Delta t \text{ secondes}}$$

C'est la ***loi du flux coupé.***

5. La production d'un courant induit par déplacement engendre des forces qui s'opposent à ce déplacement.

Supposons le conducteur MP glissant sur deux rails réunis par un fil conducteur. L'ensemble forme un circuit fermé de résistance R (fig. 5).

Lorsque MP se déplace, la f. é. m. induite ***e***, seule f. é. m. existant dans le circuit, y produit un *courant* d'intensité $i = e : R$, dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la *main gauche.*

Ce courant, qu'on appelle *courant induit,* est dans un champ magnétique, il est soumis à une *force électromagnétique* F. Cette force, située dans le plan des rails, a son sens donné par la règle des trois doigts de la *main droite : en sens inverse du mouvement.*

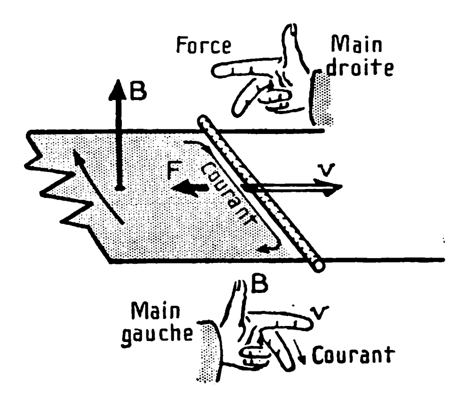


Fig. 5. — Lorsque le conducteur se déplace le circuit est parcouru par un *courant induit.* Il en résulte une force qui s'oppose à son mouvement.

Lorsqu'un conducteur, appartenant à un circuit fermé, se déplace dans un champ magnétique en coupant des lignes d'induction, le circuit est parcouru par un **courant induit.** *Le conducteur est alors soumis à une force qui s'oppose à son mouvement, c'est une* **force résistante.**

Le conducteur est un *générateur* il fournit de l'énergie électrique au circuit. Pour que son mouvement soit uniforme, le système qui l'entraîne doit exercer sur lui une force égale et opposée à F, cette force effectue un travail moteur. Le conducteur reçoit de l'énergie mécanique.

Les phénomènes d'induction permettent la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

6. La valeur de la f. é. m. induite peut être déduite de la formule du travail des forces électromagnétiques.

Nous avons vu (41e leçon) qu'en déplaçant un conducteur, parcouru par un courant i, dans le sens opposé à celui de la force électromagnétique, l'opérateur fournit un travail $\Delta W = i\Delta\Phi$, lorsque le conducteur coupe un flux $\Delta\Phi$ *webers.*

Lorsqu'il n'existe pas dans le circuit de f. é. m. autre que celle due au phénomène d'induction, le courant i est le courant induit et ΔW représente l'énergie mécanique fournie au conducteur.

Pendant la durée Δt du déplacement l'énergie électrique fournie par le générateur est $ei\Delta t$; d'après le principe de la conservation de l'énergie, il y a égalité entre l'énergie mécanique reçue et l'énergie électrique fournie :

$$ei\Delta t = i\Delta\Phi \qquad \text{d'où} \qquad e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

L'identité de cette formule avec celle, expérimentale, du paragraphe 4, confirme notre hypothèse : l'énergie mécanique est entièrement transformée en énergie électrique.

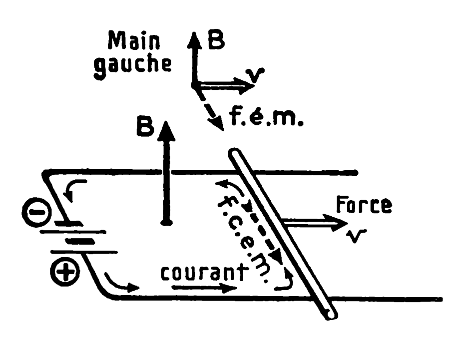


Fig. 6. — L'accumulateur produit un courant dans le circuit, le conducteur se déplace sous l'action de la force F. Il en résulte une *force-contre-électromotrice* qui s'oppose au passage du courant.

7. Les phénomènes d'induction se manifestent également dans les moteurs.

Examinons la figure 6, un conducteur est parcouru par un courant produit par un générateur. Placé dans un champ magnétique, il est soumis à une force qui le met en mouvement; il coupe alors les lignes d'induction du champ : il est le siège d'une f. é. m. induite.

Il est facile de déterminer le *sens de cette f. é. m.*, vous vous y exercerez et vous trouverez qu'elle est *de sens opposé au courant*. C'est une ***force contre-électromotrice.***

Le générateur fournit de l'énergie électrique au conducteur, alors que la force électromagnétique effectue un *travail moteur*. Le conducteur fonctionne en ***moteur*** : il transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique.

La f. c. é. m. de ce moteur est la f. é. m. d'induction produite par le déplacement du conducteur dans le champ. Elle a la *même valeur et le même sens que le conducteur fonctionne en moteur ou en générateur.*

Résumé.

1. — Quand un conducteur mobile coupe les lignes d'induction d'un champ magnétique, ce conducteur est le siège d'une force électromotrice.

Le sens de la f. é. m. induite est donné par la règle des trois doigts de la main gauche (*G*auche → *G*énérateur) :

pouce	index	majeur
↓	↓	↓
champ	chemin	f. é. m. ou courant

2. — La f. é. m. induite a pour valeur numérique :

$$\underset{volts}{e} = \underset{teslas}{B} \times \underset{m}{l} \times \underset{m/s}{v} \qquad e = \frac{\Delta\Phi \text{ webers}}{\Delta t \text{ secondes}}$$

$\Delta\Phi$ désignant le flux coupé par le conducteur pendant son déplacement.

3. — Les phénomènes d'induction permettent la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement.

Exercices.

1. Un conducteur long de 1 *m* se déplace normalement à un champ uniforme d'induction 0,1 *tesla* à la vitesse de 2 *m/s*. Quelle est la f. é. m. induite dans le conducteur?

2. Un avion métallique, d'envergure $l = 24$ *mètres*, vole horizontalement avec une vitesse de 480 *km/h* dans un lieu où la composante verticale du champ magnétique terrestre est 42 *microteslas*. Quelle est alors la f. é. m. induite entre les extrémités des ailes de l'avion? Quelle est son sens par rapport au pilote? Peut-on mesurer cette f. é. m.?

3. Une spire horizontale carrée, de 10 *cm* de côté, est fermée sur elle-même. Elle est placée dans un champ magnétique vertical de 0,2 Wb/m^2 et se déplace dans son plan, parallèlement à un de ses côtés, à une vitesse de 20 *cm/s*. La résistance électrique est 0,01 *ohm*.

a) Déterminer les f. é. m. induites dans les différents côtés et la valeur du courant dans la spire;

b) Mêmes questions lorsqu'un côté perpendiculaire à la vitesse sort du champ, le côté opposé y étant encore plongé.

Calculer alors la force nécessaire pour entraîner la spire, le travail de cette force pendant 0,25 *seconde*, ainsi que l'énergie calorifique dissipée dans la spire pendant le même temps.

4. Un conducteur rectiligne de longueur $l = 0{,}2$ *mètre* fixé suivant une génératrice d'un cylindre en bois d'axe OO′, tourne à vitesse angulaire constante dans un champ magnétique uniforme horizontal d'induction B = 0,2 *tesla*. Le cylindre a un diamètre de 10 *cm*, son axe est normal aux lignes d'induction.

Calculer la valeur de la f. é. m. induite dans le conducteur en fonction du temps lorsque le cylindre tourne à 1 500 *tr/mn*. A l'instant choisi comme origine des temps le conducteur est dans un plan vertical. Représenter graphiquement cette f. é. m. en fonction du temps.

F. é. m. induite dans un circuit.

I. — F. é. m. induite dans un circuit mobile.

1. Une bobine en mouvement dans un champ magnétique est le siège d'une f. é. m. d'induction.

Les deux extrémités d'une bobine de quelques centaines de spires sont connectées aux bornes d'un milliampèremètre dont le zéro est au milieu de l'échelle.

Aucun générateur n'existe dans ce circuit fermé.

a) Approchons la bobine du *pôle nord* d'un aimant droit, le flux à travers la bobine croît : l'aiguille du milliampèremètre dévie, par exemple *à droite* décelant l'apparition d'une f. é. m.

L'aiguille revient au zéro dès que la bobine ne se déplace plus.

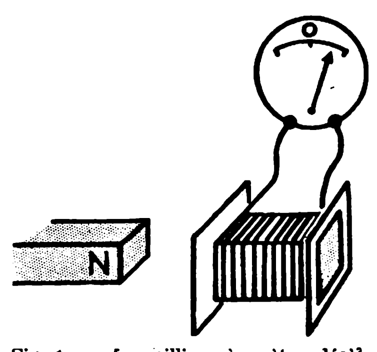
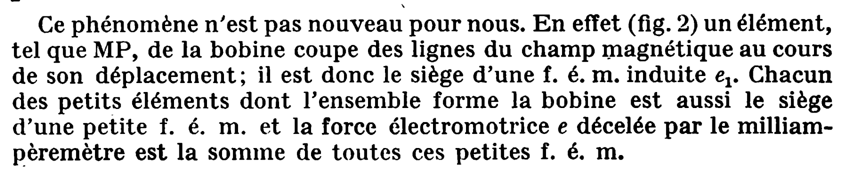


Fig. 1. — Le milliampèremètre décèle une f. é. m. lorsque l'on déplace la bobine.

Éloignons la bobine, le flux à travers la bobine décroît : le milliampèremètre dévie *à gauche*. Un bref courant s'est produit à nouveau, il est de sens contraire au précédent.

b) Approchons la bobine du *pôle sud* : le milliampèremètre dévie *à gauche*.


Ce phénomène n'est pas nouveau pour nous. En effet (fig. 2) un élément, tel que MP, de la bobine coupe des lignes du champ magnétique au cours de son déplacement; il est donc le siège d'une f. é. m. induite e_1. Chacun des petits éléments dont l'ensemble forme la bobine est aussi le siège d'une petite f. é. m. et la force électromotrice e décelée par le milliampèremètre est la somme de toutes ces petites f. é. m.

$$e = \text{somme des } e_1.$$

2. La f. é. m. induite dans un circuit mobile est liée à la variation du flux qui le traverse.

Pendant le temps Δt; l'*élément* MP coupe un flux $\Delta\varphi$, la f. é. m. induite dont il est le siège est

$$e_1 = \Delta\varphi : \Delta t.$$

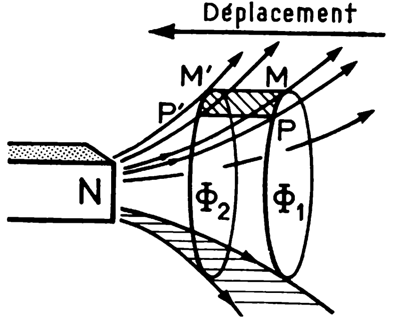


Fig. 2. — Le flux coupé est égal à la variation de flux $\Phi_2 - \Phi_1$.

La f. é. m. *e, pour le circuit entier* est :

$$e = \frac{\text{somme de } \Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\Sigma\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

$\Sigma\Delta\varphi$ est le flux coupé par le circuit entier pendant le temps Δt : il est égal à la *variation* $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ du *flux à travers le circuit.*

La f. é. m. induite dans un circuit qui se déplace, et se déforme, dans un champ fixe et constant est égale au quotient de la variation du flux à travers le circuit par la durée de cette variation.

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

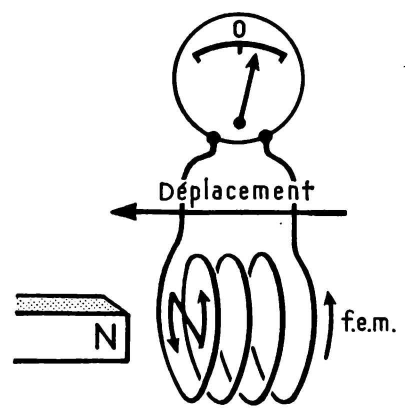


Fig. 3. — Le courant induit produit une face Nord en face du pôle Nord de l'aimant.

3. La loi de Lenz permet de déterminer le sens de la f. é. m. induite.

Si la bobine est fermée en court-circuit la f. é. m. induite produit un courant dit *courant induit*, évidemment de même sens que la f. é. m. qui le crée.

Ce sens est donnée par une règle très générale, que l'on appelle *loi de Lenz* et qu'on peut énoncer :

Le courant induit s'oppose toujours à la cause qui l'engendre.

Exemple. — La bobine *s'approche* du pôle Nord de l'aimant.

Le courant induit doit produire une *répulsion*, donc donner à la bobine une face Nord du côté de l'aimant. D'où le sens du courant induit marqué sur la figure.

Ce sens est aussi le sens de la f. é. m. qui existe, elle, même si le circuit étant interrompu, le courant est nul.

4. Le sens de la f. é. m. peut aussi être trouvé grâce à une formule algébrique.

Repérons *par une flèche* un sens de parcours de la bobine. *Par convention*, la f. é. m. e est une grandeur *algébrique positive* lorsqu'elle a le sens de la flèche, *négative* dans le cas contraire.

Convenons encore que le flux Φ est une grandeur algébrique *positive* lorsque les lignes d'induction vont de la droite *vers la gauche* d'un observateur couché sur le

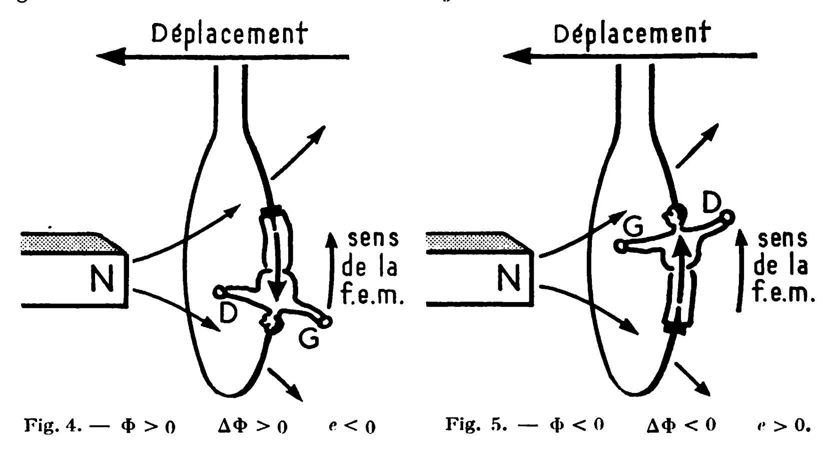


Fig. 4. — $\Phi > 0$ $\Delta\Phi > 0$ $e < 0$ Fig. 5. — $\Phi < 0$ $\Delta\Phi < 0$ $e > 0$.

fil et traversé par la flèche des pieds à la tête; *négative* dans le cas contraire.

On a alors *en grandeur et en signe*

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

e et $\Delta\Phi$ sont toujours de signes contraires.

Exemple : La bobine *s'approche* du pôle Nord de l'aimant.

a) Avec la flèche (dos de l'observateur) indiquée sur la figure 4, le flux est *positif* et il augmente en valeur absolue.

D'où algébriquement $\Delta\Phi > 0$ et $e < 0$; elle est en sens inverse de la flèche observateur.

b) Pour la même expérience, marquons la flèche en sens inverse (fig. 5). Φ est alors une grandeur *négative* dont la valeur absolue augmente : algébriquement $\Delta\Phi < 0$ et $e > 0$.

e est dans le sens de la flèche observateur.

Nous retrouvons bien entendu le même résultat physique.

II. — F. é. m. induite dans un circuit immobile.

5. Le déplacement de l'aimant produit une f. é. m. induite dans la bobine immobile.

Reprenons le dispositif expérimental du paragraphe **1**.

Fixons la bobine et approchons en l'aimant.

Pendant toute la durée du déplacement le milliampèremètre décèle la même f. é. m. que lorsque nous approchions la bobine de l'aimant fixe :

la f. é. m. d'induction ne dépend que du ***déplacement relatif*** *du circuit induit et de la source de champ magnétique.*

La loi $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ et la loi de Lenz s'appliquent encore sans aucune modification.

6. La variation du courant dans un circuit peut créer une f. é. m. dans un autre circuit.

Nous avons jusqu'à présent limité notre étude aux phénomènes au cours desquels les champs magnétiques étaient constants. Que se passe-t-il lorsqu'il y a variation du champ magnétique dans le temps?

Expériences. — Le montage représenté figure 6 comprend :

— un premier circuit formé d'une bobine A en série avec un générateur, un rhéostat et un interrupteur;

— un deuxième circuit formé d'une bobine B et d'un milliampèremètre.

Les deux bobines sont enfilées sur un noyau de fer doux; il n'y a *aucune liaison conductrice entre les deux circuits.*

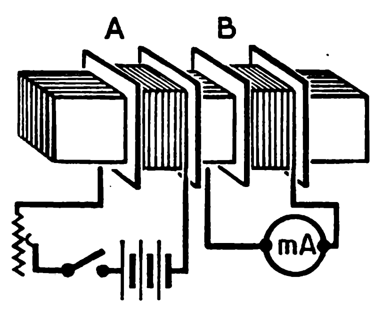


Fig. 6. — La variation de flux dans la bobine B est due à la variation de courant dans la bobine A.

a) Fermons l'interrupteur : le milliampèremètre dévie à droite, puis revient au zéro.

Ouvrons l'interrupteur, le milliampèremètre dévie à gauche.

b) L'interrupteur étant fermé, augmentons le courant dans le circuit A : le milliampèremètre dévie à droite. Diminuons le courant, l'aiguille dévie à gauche.

Toute variation du courant dans le circuit A engendre une f. é. m. et un courant dans le circuit B; c'est encore un ***phénomène d'induction.***

La bobine A, parcourue par un courant est une source de champ magnétique, c'est la ***bobine inductrice.*** Le courant qui la parcourt est le *courant inducteur.*

Lorsque ce courant varie, le champ magnétique qu'il produit varie; le flux magnétique à travers la bobine B, immobile dans ce champ variable varie. Cette bobine est le siège d'une f. é. m. induite toujours donnée par la formule :

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Application numérique. — *Une bobine très longue compte* 10 *spires par cm. La surface d'une spire mesure* 100 cm². *Elle est parcourue par un courant de* 8 *A.*

Une deuxième bobine plate de 100 *spires entoure la région médiane de la première. Elle est fermée sur elle-même, sa résistance est* 50 *ohms.*

Calculer la quantité d'électricité induite dans la deuxième bobine quand on coupe le courant dans la première.

Pendant la durée Δt, la variation du flux magnétique étant $\Delta\Phi$, la f. é. m. induite est : $e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. L'intensité du courant induit, a pour valeur : $i = \frac{e}{R} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \times \frac{1}{R}$.

Cette intensité, supposée constante pendant le temps Δt, transporte une quantité d'électricité $\Delta q = i \times \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R}$.

C'est la *quantité d'électricité induite*, elle est ***indépendante de la durée de variation du flux.***

La première bobine produit un champ uniforme d'induction

$$B = 4\,\pi . 10^{-7} \times 1\,000 \times 8 = 0{,}01 \text{ } \textit{tesla},$$

car elle comprend 1 000 *spires par mètre.*

Le flux produit à travers la deuxième bobine est

$$\Phi = NBS = 100 \times 0{,}01 \times 100 \times 10^{-4} = 0{,}01 \text{ } \textit{weber}.$$

Lorsqu'on coupe le courant la variation de flux est égale à Φ, donc nous avons :

$$\Delta q = \frac{0{,}01}{50} = 2.10^{-4} \text{ } \textit{coulomb} \text{ ou } 200 \text{ } \textit{microcoulombs}.$$

7. La loi de Lenz donne encore le sens de la f. é. m.

Lorsque le courant inducteur *croît*, le courant induit est de *sens inverse* au courant inducteur, car, d'après la loi de Lenz, ses ampères-tours doivent s'opposer à l'*augmentation* des ampères-tours inducteurs.

Lorsque le courant inducteur *décroît*, le courant induit est de même sens, car ses ampères-tours doivent s'opposer à la diminution des ampères-tours inducteurs.

III. — Lois générales des phénomènes d'induction.

8. Résumons et généralisons.

La variation de flux à travers un circuit peut-être provoquée :

soit par le *déplacement relatif* du circuit par rapport aux sources du champ magnétique;

soit par la *variation*, sans déplacement, de la source du champ;

soit par ces deux causes simultanément.

L'expérience montre que :

Toute variation du flux, quelle qu'en soit la cause produit une f. é. m. dite d'induction donnée par la formule

$$\underset{volt}{e} = - \frac{\Delta\Phi \ weber}{\Delta t \ seconde}$$

Son sens peut être trouvé grâce à la loi de Lenz.

9. Les phénomènes d'induction ont de nombreuses applications

Les figures ci-dessous en schématisent quelques-unes.

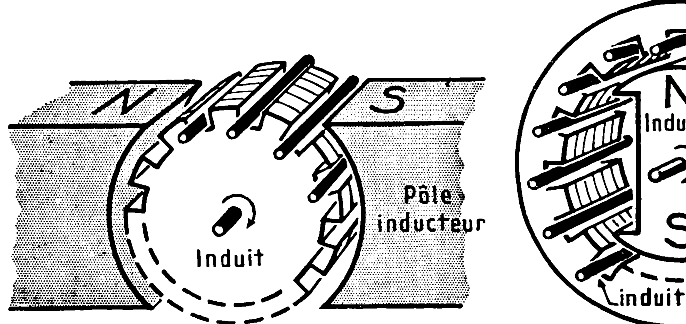


Fig. 7. — On trouve ce dispositif dans les machines à courant continu.

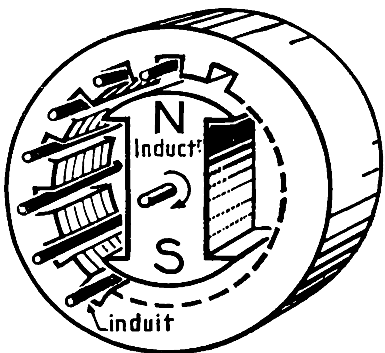


Fig. 8. — Principe d'un générateur à courants alternatifs.

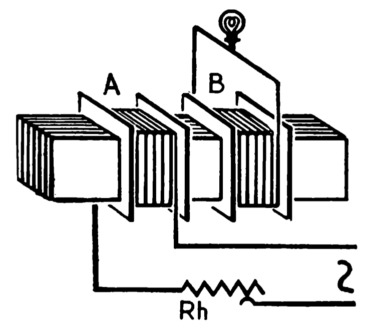


Fig. 9.
Transformateur schématique A alimentée en alternatif, la lampe s'allume.

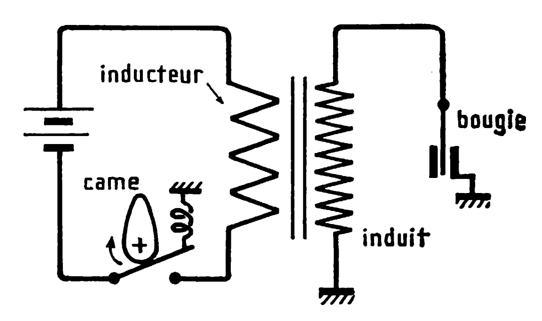


Fig. 10.
Allumage des moteurs à explosions. Une étincelle jaillit à la bougie lorsque la came ouvre le circuit inducteur.

Résumé.

1. — Lorsque le flux d'induction magnétique à travers un circuit varie en fonction du temps, pour quelque cause que ce soit, ce circuit est le siège d'une force électromotrice induite proportionnelle à la vitesse de variation du flux.

2. — Le sens de la force électromotrice induite est tel que le courant qu'elle produit s'oppose par ses effets à la variation de flux qui lui donne naissance (loi de Lenz).

3. — Ces deux lois sont résumées par la formule :

$$\underset{volts}{e} = -\frac{\Delta\Phi \text{ webers}}{\Delta t \text{ secondes}}$$

Exercices.

1. Le flux sortant d'un pôle d'aimant est 3.10^{-4} *weber*. On introduit ce pôle dans une bobine de 50 spires faisant partie d'un circuit fermé dont la résistance est 200 *ohms*. Le déplacement de l'aimant est effectué en 0,05 *seconde*. Calculer la f. é. m. induite et la quantité d'électricité induite.

2. Un cadre de 100 spires de résistance 1 Ω, de 1 m^2 de surface, est placé perpendiculairement aux lignes d'induction du champ magnétique terrestre. On fait tourner ce cadre de 90° de manière à le placer parallèlement à ces lignes de force. La quantité d'électricité induite, mesurée avec un galvanomètre balistique dont la résistance est 9 Ω, est trouvée égale à 0,000 5 *coulomb*.

Calculer l'induction magnétique terrestre.

3. 1° On considère une longue bobine portant 500 tours de fil sur une longueur de génératrice égale à 50 *cm*. Calculer l'induction magnétique obtenue dans la région centrale lorsque le fil est traversé par un courant de 10 A.

2° On dispose à l'intérieur de ce solénoïde une seconde bobine coaxiale de 4 *cm* de diamètre, contenue tout entière dans la région où le champ peut être considéré comme uniforme, et portant 1 000 tours de fil dont les extrémités sont reliées aux bornes d'un galvanomètre.

Décrire et expliquer les phénomènes observés quand on fait varier l'intensité du courant dans le solénoïde extérieur. Calculer la f. é. m. développée dans le circuit de la seconde bobine lorsqu'on diminue progressivement l'intensité du courant dans le solénoïde extérieur, en partant de la valeur initiale 10 A, pour annuler pratiquement le courant au bout de 4 *secondes*.

4. Un tore non magnétique de 10 cm^2 de section et de 150 *cm* de longueur moyenne est recouvert d'un enroulement à spires jointives comportant 1 500 spires. Il est enserré par une bobine B de 50 spires circulaires, de 6 *cm* de diamètre, de résistance 5 *ohms*, concentriques aux spires de l'enroulement du tore.

a) L'enroulement du tore est parcouru par un courant de 5 A. Calculer le flux magnétique à travers la bobine B. Ce flux dépend-il de la forme des spires?

b) On diminue régulièrement le courant dans le tore à raison de 100 A chaque dixième de seconde. Calculer la f. é. m. et le courant induit dans la bobine; déterminer leur sens par rapport à celui du courant inducteur.

5. Une bobine comporte 100 spires et a une section droite de 200 cm^2. Son axe est perpendiculaire à un champ uniforme dont l'induction est 0,1 Wb/m^2.

a) On la fait tourner de 90° en 0,075 *seconde* pour disposer son axe parallèlement aux lignes d'induction. Calculer la f. é. m. moyenne induite pendant ce déplacement.

b) Même question pour une rotation de 30° s'effectuant, à partir de la position perpendiculaire, en 0,025 *seconde*.

c) Même question pour une rotation de 30°, et de même durée, dont la position finale est celle parallèle aux lignes d'induction.

LECTURE

La découverte de l'induction électromagnétique.

*Peu après l'expérience d'*Œrsted *et les travaux d'*Ampère, Arago[1] *constata qu'une tige de fer s'aimante quand on la place dans un solénoïde parcouru par un courant. Puisqu'un courant produit un aimant, on pensa naturellement que l'on pouvait obtenir un courant avec un aimant.*

En 1821, Ampère, *qui travaillait à Genève avec le physicien suisse* de La Rive, *produisit un courant induit avec un courant inducteur, mais ce phénomène ne retint pas son attention.*

Un autre physicien français, Colladon, *habitant lui aussi Genève, imagina de placer un aimant dans un solénoïde relié à un galvanomètre. Mais pour éviter que l'appareil — un galvanomètre à aimant mobile — ne fût influencé par l'aimant en expérience, il avait pris la précaution de l'installer dans une pièce voisine de celle où il travaillait. Après avoir introduit l'aimant inducteur dans le solénoïde, Colladon allait observer le galvanomètre qui, pendant le trajet du savant, avait le temps de reprendre sa position d'équilibre. Le physicien conclut que ses expériences ne donnaient pas de résultat.*

Le célèbre Fresnel *enroula du fil sur un aimant : il n'obtint aucun courant.*

Ce fut Faraday *qui eut le mérite, en* 1831, *après sept années de recherches et des centaines d'expériences, de mettre en évidence le phénomène d'induction et d'en faire une étude qualitative complète.*

A la même date, un physicien américain, Henry, *produisait lui aussi des courants induits et observait l'auto-induction.*

La découverte de l'induction a été d'une importance considérable : produire un courant par le déplacement relatif d'un aimant et d'une bobine, c'est la possibilité de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique; c'est le principe du fonctionnement des magnétos, des dynamos et des alternateurs.

1. *François Arago* (1786-1853), savant astronome et physicien français, né à Estage (Pyrénées-Orientales). A 23 ans ,il fut élu membre de l'Académie des Sciences.

Auto-induction.

1. Un circuit présente de l'auto-induction parce qu'il est à la fois inducteur et induit.

Expériences. — *a*) Deux bobines A et B sont sur un même noyau de fer. A est alimentée par un générateur, B est fermée sur une petite lampe à incandescence (fig. 1).

Coupons le courant dans A : la lampe brille d'un vif éclat pendant un court instant. C'est la f. é. m. induite dans B qui en est la cause; A est la bobine inductrice, B l'induit.

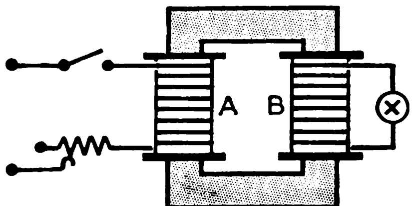


Fig. 1. — A l'ouverture de l'interrupteur la lampe brille un instant, c'est un phénomène d'induction. A est l'inducteur, B l'induit.

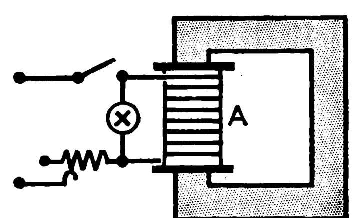


Fig. 2. — A l'ouverture de l'interrupteur, la lampe brille un instant, c'est un phénomène d'auto-induction. A est à la fois l'inducteur et l'induit.

b) Plaçons la lampe en dérivation aux bornes de A (fig. 2); réglons le rhéostat R pour que le filament soit à peine rougi.

Coupons le courant : la lampe jette encore un bref et vif éclat.

Expliquons : la bobine A parcourue par un courant produit un champ magnétique dont chaque ligne d'induction l'enserre. Ce champ engendre un flux à travers la bobine elle-même. Une variation du courant entraîne une variation du flux, donc l'apparition d'une f. é. m. induite dans le circuit lui-même. C'est le phénomène d'***auto-induction*** ou d'***induction propre***[1].

1. On dit aussi **self-induction**. *Self* est un mot anglais qui signifie soi-même, donc équivalent à *auto*.

Le circuit qui en est le siège joue en même temps le rôle d'inducteur et d'induit.

L'auto-induction est le phénomène d'induction produit par un courant dans son propre circuit.

2. Inductance d'un circuit sans fer.

En l'absence de corps ferromagnétique au voisinage du circuit, l'induction en chaque point est proportionnelle au courant i qui l'engendre. Il en est de même du flux φ à travers le circuit, c'est-à-dire du ***flux d'auto-induction*** ou ***flux propre***. On peut donc écrire :

$$\varphi = L\, i \qquad (1)$$

Le coefficient L est une caractéristique du circuit qui est appelé *coefficient d'auto-induction* ou ***inductance***[1].

Quand l'intensité varie de Δi pendant le temps Δt, le flux varie de $\Delta\varphi = L . \Delta i$ et la f. é. m. induite a pour valeur :

$$\underset{\textit{volts}}{e} = - L \, \frac{\overset{\textit{ampères}}{\Delta i}}{\underset{\textit{secondes}}{\Delta t}} . \qquad (2)$$

Le signe (—) est légitimé par la *loi de Lenz* : lorsque le courant croît, $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ est positif; la f. é. m. induite tente de s'opposer à cette augmentation, e doit être négatif lorsqu'on convient de compter, e et i comme *positifs dans le même sens.*

3. Unité d'inductance : le henry.

Dans la formule (1), si $\varphi = 1$ *wéber* et $i = 1$ *ampère*, l'inductance L est égale à l'unité. Cette unité a reçu le nom de ***henry*** (*symbole* : ***H***).

Le henry est l'inductance d'un circuit qui produit à travers lui-même un flux magnétique de 1 weber lorsqu'il est parcouru par un courant de 1 ampère.

On peut dire aussi, en vertu de la formule (2) :

Le henry est l'inductance d'un circuit dans lequel une variation uniforme de l'intensité du courant de 1 ampère par seconde produit une f. é. m. de 1 volt.

4. Calcul de l'inductance d'une bobine sans fer.

Soit un anneau non magnétique de longueur moyenne l *mètres*, de section S m^2, recouvert d'un bobinage régulier comportant N spires.

Lorsque ce bobinage est parcouru par un courant i *ampères*, il en résulte

1. On dit quelquefois *coefficient de self-induction* ou plus simplement *self.*

à l'intérieur une induction $B = 4\,\pi.10^{-7}\frac{Ni}{l}$ *Wb/m²*; d'où un flux BS à travers une section droite de l'anneau.

Le flux à travers la bobine est alors : $\varphi = NBS = 4\,\pi.10^{-7}\frac{N^2}{l}Si$ *webers*. En appliquant la relation (1), l'inductance L est :

$$\underset{henrys}{L} = 4\,\pi.10^{-7}\frac{N^2S^{m^2}}{l_m} \simeq 1{,}25.\frac{N^2S}{l}.10^{-6} \qquad (3)$$

Application *: Calculons les dimensions d'une bobine d'inductance de* **1** *henry.*

Donnons à la bobine une longueur moyenne de 1 *m* et une section de 20 *cm²*, soit 2.10^{-3} *m²*.

Pour L = 1 *henry*, il faut :

$$1 = 1{,}25\,\frac{N^2 \times 2.10^{-3}}{1} \times 10^{-6}$$

soit

$$N^2 = \frac{1}{1{,}25 \times 2 \times 10^{-3} \times 10^{-6}} = \frac{10^9}{2{,}5} = 4.10^8$$

$$N = 20\,000 \textit{ spires.}$$

La longueur de fil à enrouler atteindra 3 500 *mètres*.

Nous retiendrons de ce calcul que le henry est une unité fort grande.

La formule (3), établie par une bobine annulaire, est encore applicable en première approximation à une bobine droite dont la longueur est très grande devant les dimensions transversales de sa section droite.

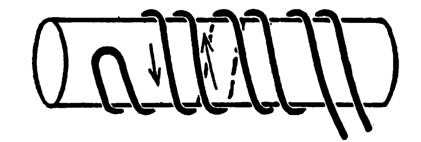


Fig. 3. — Enroulement d'une bobine d'inductance nulle ou négligeable. En réalité, les spires sont serrées les unes contre les autres.

Pour obtenir une bobine résistante sans inductance, telle que celles qui constituent les boîtes de résistances étalons ou les résistances des appareils de mesure, on plie le fil au milieu de sa longueur et l'on enroule le fil double sur la carcasse de la bobine (fig. 3). Les champs créés par deux spires voisines se détruisent, le flux propre est nul.

5. Cas d'un circuit contenant du fer.

Considérons maintenant un *anneau magnétique* sur lequel est enroulé un bobinage de N spires. Pour une valeur donnée de l'intensité du courant *i*, on peut déterminer la valeur des At/m magnétisants, la *courbe d'aimantation* nous donne alors la valeur de l'induction B dans le noyau; nous en déduisons la valeur du flux propre $\varphi = NBS$.

En procédant ainsi pour plusieurs valeurs de *i*, traçons la courbe représentant φ en fonction de *i* (fig. 4); sa forme est identique à celle de la courbe d'aimantation de la substance qui constitue l'anneau.

Le flux propre φ n'est pas proportionnel au courant i qui le produit. La f. é. m. d'auto-induction, toujours proportionnelle à la vitesse de variation du flux $\Delta\varphi : \Delta t$, n'est plus proportionnelle à $\Delta i : \Delta t$.

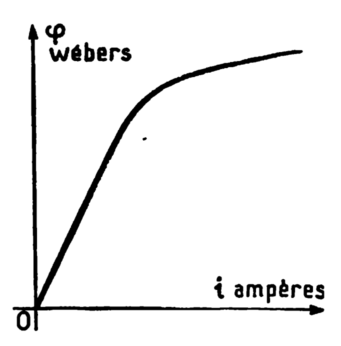


Fig. 4. — *Flux propre* dans un circuit en fonction du courant qui le produit.

Cependant, *lorsque les At/m magnétisants et l'induction restent modérés* (par exemple, pour l'acier doux, inférieurs à 500 *At/m* et à 1 *tesla*), le flux reste proportionnel au courant *i*. On peut encore écrire $e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$, L étant une constante dite *inductance du circuit* comme pour un circuit sans fer.

Cela revient à considérer la courbe de la figure 4 comme rectiligne avant le coude de saturation. Nous savons que l'induction dans le fer est μ fois plus grande que dans l'air, μ étant la *perméabilité magnétique; dans le domaine que nous envisageons μ est constante.* Le flux propre et l'inductance sont alors μ fois plus grand que dans l'air. L'inductance est donnée par la relation :

$$L = 1{,}25\,\mu\frac{N^2S}{l}10^{-6} \textit{ henrys.}$$

La perméabilité de l'acier doux avant saturation étant de l'ordre de 1 500, on voit qu'un noyau de fer augmente considérablement l'inductance d'une bobine.

Notons enfin, que la formule ci-dessus n'est *pratiquement jamais applicable* pour une bobine placée sur un noyau droit.

6. Etablissement du courant dans un circuit.

Au moment de la fermeture de l'interrupteur le courant dans le circuit est nul; après quelques instants le courant prend une valeur constante donnée par la loi d'Ohm I = U : R, c'est le courant de *régime établi ou permanent.*

Entre ces deux valeurs le courant dans le circuit varie, il y a apparition d'une f. é. m. induite qui tend à s'opposer à l'établissement du courant. Le circuit est le siège d'un *régime transitoire*; la durée de ce régime dépend du quotient L : R de l'inductance du circuit par sa résistance. On donne à ce quotient le nom de ***constante de temps du circuit***, il s'exprime en *secondes*. Le temps nécessaire au courant pour atteindre les 999/1 000 de sa valeur de régime établi est égal à 6,9 fois la constante de temps.

Expérience. — Un accumulateur alimente deux dérivations comprenant chacune une ampoule de lampe de poche en série, l'une avec un rhéostat R_1, l'autre avec une bobine de grande inductance et un rhéostat R_2 (fig. 5).

R_2 ayant une résistance nulle, réglons R_1 de façon que l'éclat des deux lampes A_1 et A_2 soit le même. Cet éclat nous renseigne sur l'intensité du courant, elle est alors la même dans les deux dérivations pour le régime permanent.

Après réglage ouvrons l'interrupteur.

Fermons-le ensuite en observant attentivement les deux lampes : A_1 prend aussitôt son éclat permanent, tandis que A_2 en série avec la bobine n'éclaire qu'avec un certain retard. *Le courant s'établit plus lentement dans le circuit inductif* (fig. 6).

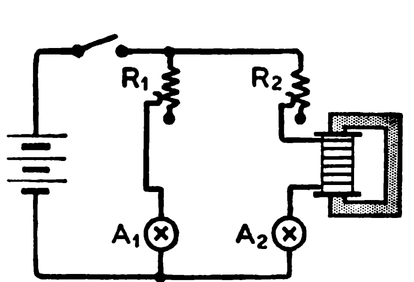


Fig. 5. — La branche R_1A_1 est peu inductive, la branche R_2A_2 est très inductive. A la fermeture du circuit les deux lampes ne s'allument pas en même temps : A_2 est en retard.

Fig. 6. — Etablissement du courant dans un circuit. Le courant atteint sa valeur de régime établi d'autant plus lentement que la constante de temps L : R du circuit est plus grande.

A l'aide de R_2, augmentons la résistance du circuit inductif, *nous diminuons sa constante de temps.*

Réglons R_1 pour avoir les mêmes intensités de régime permanent et observons à nouveau les deux lampes au moment de la fermeture de l'interrupteur : *le retard de A_2 est beaucoup moins grand.*

7. Coupure du courant dans un circuit.

Au début de cette leçon, nous avons vu que la f. é. m. d'auto-induction produit une brève surtension, aux bornes d'une portion de circuit inductive, au moment de la coupure du courant. Cette surtension peut être très importante.

Expérience. — Utilisons une *lampe veilleuse au néon* qui s'allume lorsque la tension entre ses bornes est *au moins* 80 *volts*, seule l'électrode positive s'illumine.

Cette lampe est montée en parallèle avec une bobine, l'ensemble est alimenté par une batterie d'accumulateurs de f. é. m. 6 *V* (fig. 7).

Dans ces conditions la lampe est éteinte. L'ampèremètre indique 0,3 A.

Ouvrons brusquement l'interrupteur, la lampe jette un bref et vif éclat; c'est l'électrode reliée au pôle négatif de la batterie qui s'illumine.

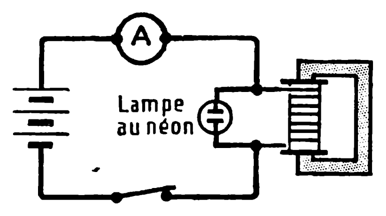


Fig. 7. — *En régime établi,* la lampe au néon est éteinte. *A l'ouverture du circuit,* la lampe au néon jette un bref et vif éclat, la tension entre ses bornes est alors supérieure à 80 *volts.*

Expliquons **:** *En régime établi,* la tension aux bornes de la lampe est de l'ordre de 6 V, donc très inférieure à sa tension d'allumage (80 V).

A l'ouverture du circuit, le courant décroît dans la bobine. Il en résulte une f. é. m. d'auto-induction qui tend à conserver au courant sa valeur initiale. Cette f. é. m. produit aux bornes de la lampe une tension supérieure à sa tension d'allumage, soit une *grande surtension* par rapport au régime établi.

Après l'ouverture du circuit, un courant, de même sens que celui de régime, se prolonge pendant un court instant dans la bobine et la lampe (fig. 8). C'est la bobine, siège de la force électromotrice, qui joue le rôle de générateur. La *tension entre ses bornes* s'est *inversée.*

On peut brancher la lampe au néon en parallèle avec l'interrupteur; on constate qu'une *surtension* apparaît également *aux bornes de l'interrupteur* lorsqu'on coupe le courant.

Fig. 8. — *A l'ouverture du circuit,* la tension aux bornes de la bobine s'inverse pendant un temps très court.

La lampe éteinte peut être assimilée à une résistance d'environ 5 000 *ohms,* lorsque nous ouvrons l'interrupteur, nous intercalons cette résistance dans le circuit. Pendant un temps très court, la f. é. m. d'autoinduction tend à conserver au courant sa valeur initiale 0,3 A; c'est donc une tension de l'ordre de $5\,000 \times 0{,}3 = 1\,500$ *volts* qui apparaît aux bornes de la lampe et de l'interrupteur. Remarquons qu'elle n'a qu'une très courte durée.

Débranchons la lampe, lorsque nous ouvrons l'interrupteur la résistance du circuit devient infini, les surtensions peuvent devenir très importantes : l'isolant de la bobine peut être percé, *une étincelle jaillit entre les contacts de l'interrupteur* (fig. 9).

Cette ***étincelle de rupture*** est conductrice, mais sa résistance est mal définie. Le phénomène très complexe est difficile à interpréter simplement.

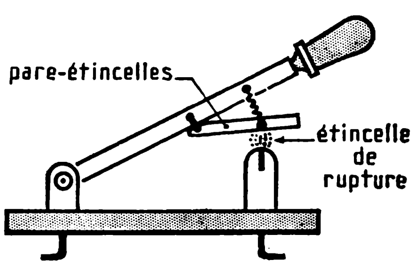


Fig. 9. — Une ***étincelle de rupture*** jaillit entre les contacts de l'interrupteur lorsqu'on ouvre un circuit inductif parcouru par un courant continu.

8. Energie électromagnétique du champ d'un courant.

Une quantité d'énergie notable apparaît dans les étincelles de rupture lorsqu'on coupe un circuit inductif. Cette énergie était emmagasinée dans le champ magnétique créé par le courant qui circule dans le circuit.

On démontre que, si l'intensité de régime est I *ampères* et l'inductance du circuit L *henrys*, cette énergie électromagnétique a pour valeur :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \textit{ joules.}$$

L'auto-induction tend à s'opposer aux variations du courant comme la masse tend à s'opposer par son inertie aux variations de vitesse; c'est un *phénomène d'inertie du courant* qui intervient chaque fois que varie la vitesse des électrons qui constitue le courant.

Pour augmenter la vitesse d'un corps il faut lui fournir une certaine énergie qu'il emmagasine sous forme d'*énergie cinétique* et qu'il restitue lors d'un ralentissement. Pour augmenter la vitesse des électrons, donc l'intensité du courant, il faut fournir au circuit une certaine énergie, qu'il emmagasine dans un champ magnétique; cette énergie est restituée lorsque le courant décroît, donc lorsque la vitesse des électrons diminue.

On remarquera l'analogie entre les expressions de l'énergie cinétique $\frac{1}{2} mv^2$ et de l'énergie électromagnétique $\frac{1}{2} L I^2$.

9. Importance des phénomènes d'auto-induction.

En *courant continu* l'auto-induction intervient, pendant un temps très court, à la fermeture ou à l'ouverture du circuit.

Si nous faisons exception pour les circuits inducteurs de machines électriques qui sont très inductifs, l'*auto-induction a peu d'importance pratique.*

On peut l'utiliser, comme dans les allumoirs électriques, mais plus souvent on doit éviter les effets destructeurs des étincelles de rupture ou des surtensions.

L'auto-induction rend difficile la coupure d'un courant continu, elle oblige les constructeurs à munir les interrupteurs de dispositifs destinés à réduire l'étincelle de rupture (coupure en plusieurs temps en intercalant des résistances dans le circuit) ou à limiter ses effets (contacts anti-arc, lames pare-étincelles).

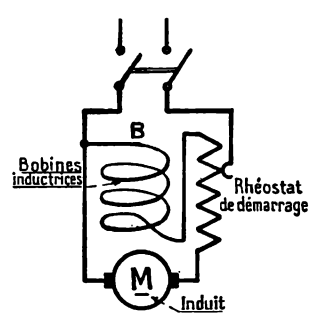


Fig. 10. — Montage anti-inductif d'un moteur à courant continu. Les bobines inductrices, dont l'inductance est importante, sont court-circuitées par l'induit et le rhéostat de démarrage.

Les surtensions produites dans un bobinage à la coupure du courant peuvent détériorer un voltmètre branché aux bornes ou percer l'isolant des fils. On évite cet accident dans les machines électriques en réalisant, si possible, un montage qui laisse constamment les bobines inductrices dans un circuit fermé (fig. 10). L'auto-induction y prolonge le courant sans surtension.

En ***courant alternatif*** l'auto-induction intervient à tout instant puisque le courant est constamment variable.

Résumé.

1. — Un circuit présente de l'auto-induction parce qu'il est à la fois inducteur et induit.

Toute variation du courant dans un circuit engendre dans ce circuit une force électromotrice d'auto-induction qui s'oppose à la variation du courant.

2. — La f. é. m. d'auto-induction a pour valeur :

$$e = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Le coefficient L étant l'inductance du circuit.

3. — L'unité d'inductance est le *henry* : c'est l'inductance d'un circuit dans lequel une variation régulière d'intensité du courant de 1 ampère par seconde produit une f. é. m. de 1 volt.

4. — En courant continu l'auto-induction a un rôle important lors de la fermeture ou de l'ouverture d'un circuit.

Exercices.

1. Calculer l'inductance d'une bobine enroulée sur un anneau en bois de diamètre moyen 20 *cm* et de section carrée de 2 *cm* de côté. La bobine comporte 500 spires.

2. Calculer l'inductance d'une bobine cylindrique sans fer de 40 *cm* de longueur, ayant 2 000 spires et dont le diamètre moyen est de 2 *cm*.

3. On dispose de deux bobines sans noyau de fer A et B, identiques, dont l'inductance est 0,1 henry. On les monte en série :

1° à grande distance l'une de l'autre, de manière que le flux de chacune ne traverse pas l'autre;

2° dans le prolongement l'une de l'autre et accolées, de manière que le flux de A s'ajoute à celui de B et le flux de B à celui de A;

3° dans le prolongement l'une de l'autre et accolées, de manière que leurs flux s'opposent.

Quelle est, dans chaque cas, l'inductance de l'ensemble des bobines A et B?

Les trois réponses sont-elles rigoureusement exactes; pourquoi?

4. Une bobine est enroulée sur un anneau de fer doux, elle comporte 500 spires régulièrement réparties. L'anneau a un diamètre moyen de 20 *cm* et une section carrée de 2 *cm* de côté.

Le fer doux a une perméabilité constante égale à 1 600 jusqu'à une induction de 1 *tesla*.

Calculer l'inductance de cette bobine.

Quelle est la valeur maximum du courant magnétisant pour rester dans le domaine où ce résultat est valable?

5. Un circuit magnétique non saturé porte un enroulement dans lequel on fait croître l'intensité du courant de 0 à 2 A en 0,1 *seconde*. L'énergie électrique absorbée par la bobine pendant ce temps est de 2,7 *joules*; 0,36 *calories* se transforment en chaleur par effet Joule. Le flux d'induction à travers une section droite du circuit magnétique est alors 2 *milliwébers*. Calculer :

1° l'énergie électromagnétique emmagasinée dans le champ magnétique lorsque l'intensité du courant dans la bobine est 2 A;

2° l'inductance de la bobine;

3° le nombre de spires de la bobine.

NOTES COMPLÉMENTAIRES

1° *Bobine à noyau de fer.*

Un cas très important est celui des bobines parcourues par un courant continu qui subit de petites variations autour de sa valeur moyenne. C'est le cas des bobines de filtrage utilisées dans les redresseurs.

On a encore une f. é. m. d'auto-induction $e = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ qui peut s'écrire

$$e = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta i}\cdot\frac{\Delta i}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}, \text{ en posant } L = \frac{\Delta\varphi}{\Delta i}.$$

Lorsque Δi tend vers zéro $\frac{\Delta\varphi}{\Delta i}$ tend vers la dérivée $\frac{d\varphi}{di}$ du flux propre par rapport au courant. Graphiquement cette dérivée est donnée par la pente de la tangente à la courbe de la figure 4 en un point d'abscisse I égal à l'intensité du courant continu circulant dans la bobine.

On définit ainsi une inductance, variable avec la valeur de I, qui n'est utilisable que pour de petites variations du courant autour de cette valeur moyenne I. On peut l'appeler ***inductance différentielle.***

En examinant la figure 4, on voit que la pente de la courbe diminue lorsque I croît, l'inductance différentielle diminue lorsque le courant moyen croît.

Une bobine à noyau de fer pour filtre est commercialement désignée par son inductance différentielle, on doit bien entendu indiquer le courant moyen correspondant. On dit, par exemple, une bobine de filtrage 15 *henrys*, 100 *mA*.

2° ***Energie électromagnétique.***

Lorsque nous appliquons une tension U aux bornes d'une inductance, de *résistance négligeable,* le courant s'établit suivant la loi : $U = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$, c'est-à-dire à une vitesse $\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U}{L}$ constante. Le courant croît donc proportionnellement au temps, au bout du temps T il a acquis l'intensité $I = \frac{U}{L}T$.

Pendant ces T *secondes,* le *courant moyen* est I : 2, la quantité d'électricité fournie sous la tension U par la source de courant est : Q = IT : 2 et l'énergie électrique apportée à l'inductance est $W = UQ = \frac{UIT}{2}$ *joules.*

On peut écrire cette énergie, $W = \frac{1}{2}LI^2$, car UT = IL.

Cette énergie ne se retrouve ni sous forme calorifique, le fil étant de résistance négligeable, ni sous forme mécanique, la bobine étant immobile. Nous devons concevoir qu'*elle se retrouve accumulée dans l'espace où règne le champ magnétique de la bobine.*

On peut écrire cette énergie $W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\Phi I$, forme qui met mieux en évidence le rôle du champ magnétique.

Induction dans les masses métalliques. Courants de Foucault.

1. Expériences.

Appareil. Un grand disque de cuivre épais tourne autour d'un axe horizontal. Il est mis en mouvement par une ficelle enroulée sur l'axe et qui se déroule sous l'action d'un poids. Le disque tourne entre les pièces polaires d'un électro-aimant (fig. 1).

1re Expérience. — Pas de courant dans l'électro. Sous l'action du poids, le disque prend un mouvement de rotation de plus en plus rapide : il fait environ 5 tours en 4 secondes lorsque le poids arrive près du sol.

2e Expérience. — Faisons passer dans l'électro un courant de 3 ampères. *La rotation du disque est très ralentie;* elle devient bientôt *constante :* 15 *tr/mn*, par exemple.

Avec un courant de 5 ampères, la rotation est encore plus lente : 9 *tr/mn*, lorsqu'elle est devenue uniforme.

Fig. 1. — Disque de Foucault : on ralentit sa rotation en excitant l'électro-aimant.

Donc, le champ magnétique établi entre les pièces polaires de l'électro freine le déplacement et le freinage est d'autant plus énergique que le champ est plus intense.

2. Le freinage du disque s'explique par les courants induits qui se produisent dans la masse du laiton.

Une région linéaire AB du disque (fig. 2), prise dans le sens d'un rayon, dans la partie qui passe entre les pièces polaires, coupe le flux de l'électro; il en résulte une f. é. m. induite, dans le sens AB dans le cas de la figure

(règle des trois doigts de la main gauche), et des courants qui se ferment à travers le laiton dans un plan perpendiculaire au champ.

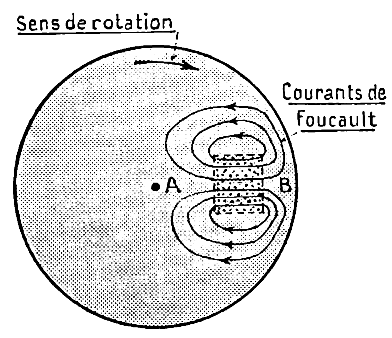


Fig. 2. — Les courants de Foucault se ferment dans le disque. Le carré pointillé représente les lignes d'induction qui traversent normalement le disque d'avant en arrière (voir figure 1).

Ces courants induits s'opposent à la cause qui les produit : ici la rotation du disque; ils jouent donc le rôle de frein.

On peut d'ailleurs vérifier que les forces électromagnétiques exercées par les pôles N et S de l'électro sur les courants tendent bien à arrêter le disque [1].

REMARQUE. — Le métal est bon conducteur; les courants sont intenses. Ils transforment finalement en chaleur par effet Joule le travail de la force qui met le disque en mouvement. Si, avec une manivelle ou un moteur, on forçait le disque à tourner vite et longtemps entre les pôles de l'électro, il s'échaufferait beaucoup.

On donne à ces courants induits dans des masses métalliques, par un champ magnétique qui varie d'intensité ou qui se déplace par rapport aux masses, le nom de ***courants de Foucault*** [2].

3. Les courants de Foucault sont le plus souvent nuisibles.

On utilise les courants de Foucault pour amortir les oscillations des équipages mobiles de certains appareils de mesures et aussi pour freiner le disque mobile des compteurs électriques.

Mais, en général, dans les machines électriques, ils sont nuisibles : ils dépensent inutilement de l'énergie, ils produisent un échauffement des machines. C'est ainsi que si nous faisons passer du courant alternatif à 50 périodes, qui change 100 fois le sens de l'aimantation par seconde, dans un électro à noyau massif, au bout de quelques minutes le noyau est très chaud.

4. On affaiblit considérablement les courants de Foucault en feuilletant les masses métalliques.

Expérience. — Recommençons l'expérience du disque de Foucault en utilisant un disque de mêmes dimensions que celui qui nous a servi dans les expériences précédentes, mais fendu de nombreux traits de scie suivant des rayons.

1. Nous laissons au professeur le soin de faire faire cette vérification par les élèves.
2. *Foucault*, physicien français, né et mort à Paris (1819-1868).

Alors que la vitesse du disque plein passant de 75 *tr/mm* à 9 *tr/mm* pour un courant de 5 ampères dans l'électro, celle du disque fendu passe de 75 *tr/mm* à 60 *tr/mm*.

Les courants de Foucault ne sont pas supprimés, mais très atténués par les traits de scie qui limitent à une petite bande la région où se produisent ces courants.

Dans les machines électriques, les parties métalliques soumises à des champs magnétiques variables sont feuilletées.

Les induits en fer des dynamos, des moteurs à courant continu, des alternateurs, les rotors et stators des moteurs à courant alternatif, toutes les carcasses des transformateurs sont constitués par tôles minces empilées et séparées par des feuilles de papier isolant. Les surfaces de séparation des tôles sont dans des plans parallèles au champ magnétique (fig. 3).

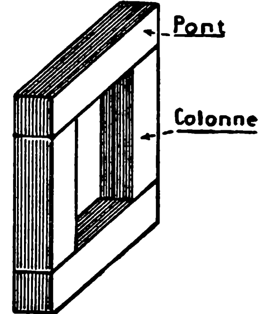


Fig. 3. — Carcasse feuilletée d'un transformateur monophasé.

De plus, ces tôles sont faites d'un acier au silicium à grande résistivité électrique, plus de 20 $\mu\Omega \cdot cm$. On gêne ainsi le développement des courants de Foucault et les pertes d'énergie sont réduites.

5. Caractéristiques des tôles employées dans la fabrication du matériel électrique.

La qualité des tôles, en ce qui concerne les pertes par hystérésis et courants de Foucault, est indiquée par le nombre de watts perdus par kilogramme de tôle soumis à une induction alternative de 10 000 *gauss* à raison de 50 *cycles d'aimantation par seconde.*

Pour une tôle ordinaire, d'épaisseur 50/100, la perte est de 3,2 *watts* par kilogramme.

Pour une tôle spéciale, d'épaisseur 35/100, et d'une autre composition, cette perte n'est que 1,1 watt par kilogramme.

En pratique, on ne cherche pas à évaluer séparément les pertes dues à l'hystérésis et les pertes dues aux courants de Foucault. Les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de l'induction et au carré du nombre de cycles d'aimantation par seconde; celles causées par l'hystérésis sont aussi à peu près proportionnelles au carré de l'induction, mais proportionnelles seulement au nombre de cycles d'aimantation par seconde; cette différence permet par le calcul de séparer ces pertes, c'est-à-dire de les évaluer séparément.

Ces pertes augmentent, en général, au bout d'un certain temps de fonctionnement des machines électriques, c'est le phénomène du « vieillissement des tôles ».

Exercices.

1. Dans les expériences décrites au paragraphe 1, on a constaté qu'en augmentant le champ magnétique à travers le disque de Foucault, la vitesse de rotation de ce disque diminuait beaucoup. Si le champ était très intense, le disque s'arrêterait-il? Pourquoi?

2. La carcasse d'un petit transformateur est faite de deux colonnes feuilletées ayant 150 *mm* de hauteur et une section rectangulaire de 33 *mm* sur 41 *mm* réunies par deux ponts de même section que les colonnes et longs de 152 *mm*.

Calculer :

1° le volume de la carcasse;

2° le poids de cette carcasse sachant que le dm^3 de tôles pèse 7 *kg*;

3° la perte en watts dans cette carcasse quand elle subit 50 cycles d'aimantation par seconde avec une induction maximum de 1 Wb/m^2.

La carcasse est faite de tôles qualité 1,3 watts.

3. On démontre que la puissance perdue à cause des courants de Foucault dans un volume de V de fer feuilleté, constitué par des tôles d'épaisseur e, empilées et isolées électriquement les unes des autres, de résistivité ρ, soumis à une induction alternative qui varie f fois par seconde de $-B$ à $+B$ et de $+B$ à $-B$, est directement proportionnelle à V, à B^2, à f^2, à e^2 et inversement proportionnelle à ρ.

En fabricant des tôles très minces ($e = 0{,}3$ à $0{,}5$ *mm*), et de grande résistivité ($\rho = 40\ \mu\ \Omega.cm$), on est arrivé à réduire beaucoup les pertes de courants de Foucault dans les carcasses magnétiques des machines électriques.

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à f et à B^2.

Sachant que les pertes totales par hystérésis et courants de Foucault dans un kilogramme de tôle pour $B = 1\ Wb/m^2$ sont 1,6 *watts* quand $f = 50$ et 0,73 *watts* quand $f = 25$, calculer la puissance H perdue par hystérésis et la puissance F perdue par courants de Foucault pour $f = 50$ et le rapport des pertes par courants de Foucault aux pertes magnétiques totales.

4. Pour freiner la rotation d'un axe, on cale sur cet axe un disque d'aluminium qui passe entre les pôles d'un ou plusieurs aimants permanents en fer à cheval.

On règle le freinage en rapprochant ou en éloignant les aimants de l'axe du disque.

Expliquez le fonctionnement de ce dispositif.

12. — APPAREILS DE MESURES ÉLECTRIQUES. MESURE DES RÉSISTANCES

46e LEÇON

Galvanomètre à cadre mobile.

1. Examinons et dessinons un galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

Un cadre ABCD de fil fin (400 spires, fil 0,17 *mm*) est soutenu par des fils d'argent fins[1] (0,15 *mm*) par lesquels le courant arrive et s'en va.

Il est placé dans le champ d'un fort aimant en fer à cheval.

Un cylindre creux de fer doux, fixe à l'intérieur du cadre, et deux pièces polaires à l'extérieur ne laissent qu'un faible entrefer pour que le champ soit intense dans la région où se déplace le cadre. Un petit miroir M est fixé au cadre (fig. 1 et 1 *bis*).

L'ensemble est fragile. L'appareil est un instru-

1. Pour les galvanomètres très sensibles on utilise des fils de suspension encore plus fins (0,08 mm).

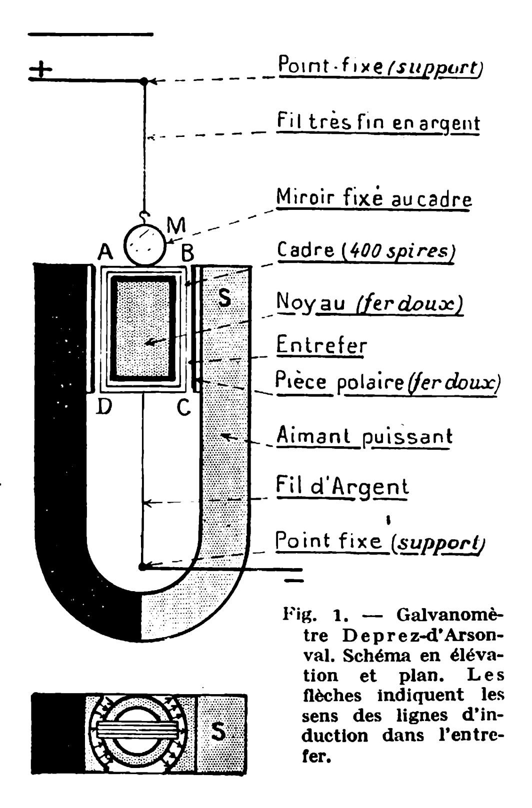


Fig. 1. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Schéma en élévation et plan. Les flèches indiquent les sens des lignes d'induction dans l'entrefer.

ment de laboratoire (fig. 2). Il ne peut supporter que des courants très faibles, de l'ordre de 1 : 100 000 d'ampère

2. Faisons fonctionner le galvanomètre.

1. Mettons en série avec le galvanomètre une résistance de 100 000 ohms, une pile Leclanché et un interrupteur. Envoyons sur le miroir un rayon lumineux qui se réfléchit et vient former une tache de lumière *(spot)* sur une échelle transparente graduée en millimètres.

Fermons l'interrupteur : la tache lumineuse se déplace horizontalement, et après oscillations, se fixe à une division de l'échelle, par exemple à la division 40.

Le cadre mobile a tourné dans le champ de l'aimant tordant les fils de suspension; sa position est repérée par le rayon lumineux réfléchi qui joue le rôle d'une longue aiguille sans poids.

2. Coupons le courant : le spot, et, par suite, le cadre, revient à sa position de départ après plusieurs oscillations.

3. Recommençons l'expérience en remplaçant la résistance de 100 000 ohms par une autre de 50 000. Le spot dévie jusqu'à la division 80.

La f. é. m. dans le circuit n'a pas changé. La résistance de ce circuit a diminué de moitié (on peut négliger la résistance du cadre et la résistance intérieure de la pile qui sont petites par rapport à la résistance 50 000 Ω). L'intensité du courant a doublé. ***La déviation du cadre est donc proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse.***

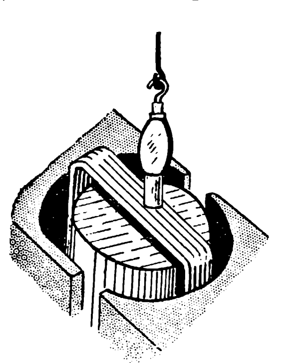
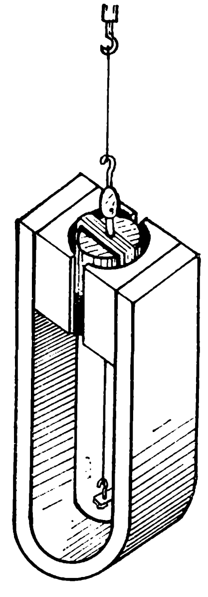



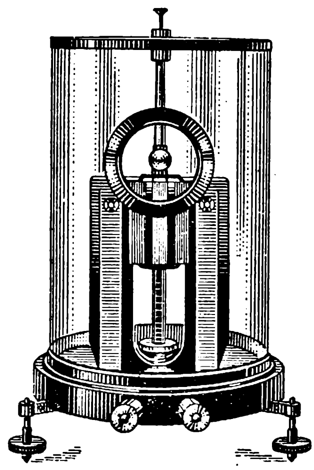
Fig. 1 *bis*. — Perspective de l'aimant et de la partie supérieure du cadre d'un galvanomètre à cadre mobile.

4. Recommençons l'expérience après avoir shunté le galvanomètre par une résistance d'une centaine d'ohms. Le cadre dévie moins, mais nous remarquons qu'il arrive à sa position d'équilibre et qu'il revient, le courant supprimé, à sa position de départ sans osciller.

On dit que son mouvement est amorti, ou encore que l'appareil est devenu ***apériodique.***

3. Explication du fonctionnement du galvanomètre.

a) Soit B l'induction du champ produit par l'aimant dans la **région** de l'entrefer où passe le cadre. Ce champ est perpendiculaire au cylindre creux, il a la même valeur dans tout l'entrefer. C'est un champ radial (fig. 1-plan).



Cliché Carpentier

Fig. 2. — Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval est un appareil de laboratoire.

Soit I le courant passant dans le cadre *dans le sens des lettres*. Le côté DA est soumis à une force proportionnelle à I et à B et perpendiculaire au cadre et au champ Il se déplace vers l'arrière de la figure 1 (règle des trois doigts de la main droite). Le côté BC est soumis à une force égale et se déplace vers l'avant. Le cadre tourne donc sous l'action d'un couple de moment $M = k\text{IB}$, k étant un facteur de proportionnalité que nous ne cherchons pas à évaluer.

En tournant, il tord ses fils de suspension. Cette torsion des fils produit un couple antagoniste dont le moment est proportionnel à l'angle de torsion α tant que l'on ne dépasse pas la limite d'élasticité du métal : $M' = k'\alpha$.

Quand il y a **équilibre,** les deux moments sont égaux.

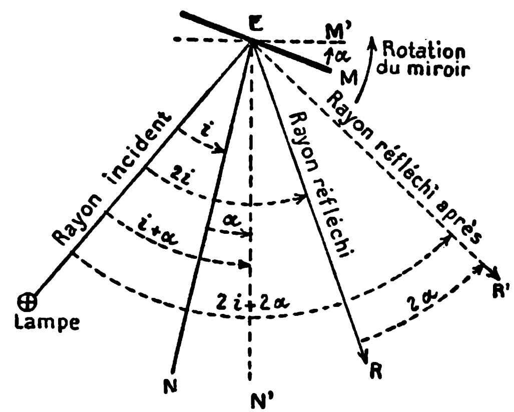
$$k\text{I}B = k'\alpha$$

$$\alpha = \frac{kB}{k'}\,\text{I}.$$

L'angle de rotation est proportionnel à l'intensité du courant dans le cadre.

b) Le miroir M tourne avec le cadre d'un angle α (fig. 3) et vient en M'. La normale EN au miroir tourne en EN' d'un angle : $NEN' = \alpha$.

Soit LE le rayon lumineux incident faisant un angle i avec la normale. Le rayon réfléchi ER fait avec le rayon incident un angle $2i$.



Fi. 3. — Quand le miroir M tourne d'un angle α, le rayon réfléchi ER vient en ER' : il tourne d'un angle 2α.

Après rotation du miroir, l'angle d'incidence devient $i + \alpha$ et le nouveau rayon réfléchi ER′ fait un angle $2i + 2\alpha$ avec le rayon incident, soit un angle 2α avec le rayon réfléchi ER.

Donc, quand le miroir tourne d'un angle α, le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α, dans le même sens.

Ce procédé de mesure d'un angle de déviation par la rotation d'un rayon lumineux s'appelle la *méthode de Poggendorf.*

c) La suppression des oscillations du cadre, quand une résistance assez faible est en dérivation aux bornes de l'appareil, s'explique par les courants induits qui se produisent dans le cadre, quand il se déplace dans le champ de l'aimant. Si le circuit est peu résistant, ces courants induits sont relativement intenses et freinent énergiquement le cadre.

4. Le galvanomètre à cadre mobile est très sensible.

Les expériences du paragraphe 2 nous ont montré qu'il suffit d'un courant faible pour obtenir une déviation du cadre mobile visible sur l'échelle graduée.

On caractérise la sensibilité de l'appareil par l'intensité du courant qui produit une déviation du spot de 1 millimètre sur l'échelle placée à 1 mètre du miroir. Plus cette intensité est faible, plus la sensibilité est grande.

On obtient une grande sensibilité en employant :

1° un fil de suspension très fin et même un fil plat;

2° un cadre comportant un grand nombre de spires; mais pour ne pas alourdir le cadre, il faut le bobiner de fil très fin et sa résistance est importante.

Indiquons pour fixer les idées que, suivant les modèles, la sensibilité est comprise entre $2\,600.10^{-10}$ et 8.10^{-10} ampères.

Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval est surtout employé pour constater qu'aucun courant ne passe dans le circuit où il est placé : il sert comme *appareil de zéro.*

On l'utilise aussi pour mesurer des courants très faibles; il faut alors l'étalonner au début de chaque séance de mesures.

Pour rendre plus commode le galvanomètre à cadre mobile, on le munit parfois d'une aiguille qui se déplace sur un cadran gradué : l'aiguille alourdit le cadre; elle est relativement courte, la sensibilité de l'appareil est très diminuée.

Elle l'est encore davantage dans d'autres modèles transportables où le cadre mobile est monté sur pivots avec des ressorts spiraux pour le ramener au zéro et pour conduire le courant.

5. Les galvanomètres balistiques et les fluxmètres sont des galvanomètres à cadre mobile un peu modifiés.

Galvanomètre balistique. — L'équipage mobile est constitué, soit par un cadre dont la largeur AB (fig. 1) a été très augmentée, soit par

un cadre surchargé de masses additionnelles placées à une distance aussi grande que possible de l'axe de rotation (fig. 4). Le cadre oscille lentement : la durée d'une oscillation double atteint 10 à 20 secondes.

Si l'on fait passer dans l'appareil, en un temps très court, une quantité d'électricité Q, le courant a cessé avant que le cadre ait bougé sensiblement. L'équipage mobile est lancé par une brève impulsion, d'où le nom de balistique donné à l'instrument. Le cadre oscille. On démontre que *l'amplitude de la première oscillation du cadre, ou* élongation, *est proportionnelle à la quantité Q d'électricité.*

On étalonne le galvanomètre chaque fois que l'on veut s'en servir en y faisant passer une quantité connue d'électricité. Il sert à mesurer les quantités d'électricité, ou les flux, puisqu'en supprimant un flux $\Delta\Phi$ *wébers* dans un circuit de résistance R, il se produit une quantité d'électricité

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \text{ coulombs.}$$

Cadre mobile
m m'

Fig. 4. — L'addition des surcharges *m* et *m'* transforme un galvanomètre ordinaire en balistique.

Fluxmètre. — C'est un galvanomètre dont le cadre, monté sur pivots, n'a pas de spiraux pour le rappeler au zéro et créer un couple antagoniste.

On démontre les deux propriétés suivantes :

a) Si l'on envoie, *pendant un temps quelconque*, dans le cadre shunte par une résistance R, une quantité d'électricité Q, la déviation du cadre est proportionnelle à R × Q.

b) Si l'on monte aux bornes de l'appareil (non shunté), une bobine B dans laquelle on produit une variation de flux $\Delta\Phi$, la déviation du cadre mobile est proportionnelle à $\Delta\Phi$.

Le fluxmètre sert donc, soit à mesurer des quantités d'électricité, soit à mesurer des flux, et ceci plus commodément que le balistique.

Exercices.

1. Le cadre du galvanomètre décrit dans la leçon a une résistance de 60 Ω. Pour l'amortir, on le shunte par une résistance de 150 Ω. Quelle est la fraction du courant principal qui passe dans le cadre?

2. Un courant de 0,625 micro-ampères suffit pour faire dévier de façon appréciable un galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Combien de temps faudrait-il à un tel courant traversant un voltamètre à eau-acide sulfurique pour libérer 1 cm^3 d'hydrogène?

On rappelle que 96 500 coulombs libèrent 1 *g* d'hydrogène et que 2 *g* d'hydrogène occupent dans les conditions normales de température et de pression un volume d'environ 22,4 litres.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Le fluxmètre.

Nous avons appris (38e Leçon) à nous servir d'un fluxmètre; voici le principe du fonctionnement de cet appareil.

1. Un fluxmètre est un galvanomètre sans spiraux de rappel au zéro.

Le cadre mobile est monté entre pivots. Le courant est amené au cadre par des fils très souples qui ne gênent en rien son déplacement (fig. 5).

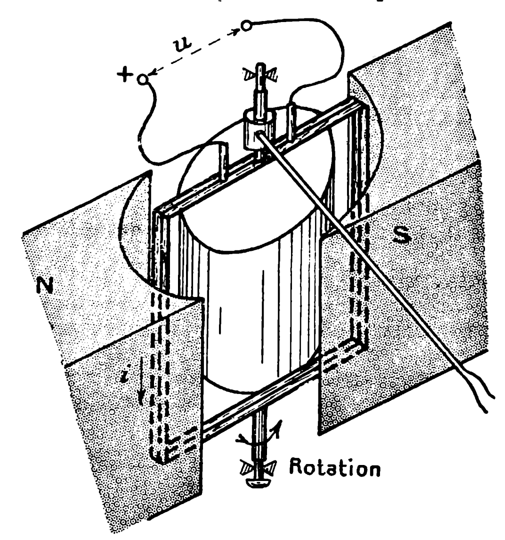


Fig. 5. — Mouvement du cadre d'un fluxmètre dans le champ de l'aimant.

Appliquons aux bornes de l'appareil une tension constante u. Le courant i qui traverse le cadre produit un couple dont le moment $\mathcal{M}$ est proportionnel à i. Le cadre se met à tourner, et le mouvement s'accélère d'abord.

Mais, dans leur déplacement, les fils du cadre coupent les lignes d'induction du champ; il naît une force électromotrice e proportionnelle à la vitesse de rotation du cadre et s'opposant, d'après la loi de Lenz, au passage du courant.

Si R est la résistance du cadre, en appliquant la loi d'Ohm :

$$i = \frac{u - e}{R}.$$

Au fur et à mesure que la vitesse de rotation croît, e augmente, l'intensité i et le couple de moment $\mathcal{M}$ qui lui est proportionnel diminuent : *le mouvement est de moins en moins accéléré.*

Finalement la vitesse tend vers une *valeur limite* pour laquelle l'intensité et le couple s'annulent : on a alors $u = e$. Le cadre lancé n'est plus soumis à aucune force, il tourne à vitesse constante par inertie.

Cette vitesse est proportionnelle à e, donc à la tension u. Soit v la vitesse en divisions de la graduation par seconde :

$$v = ku \qquad (k \text{ est une constante}).$$

Par exemple, un certain fluxmètre tourne de 1 division par seconde lorsque $u \doteq 10^{-4}$ volt.

Dans son emploi normal, le fluxmètre est peu résistant (30 Ω au maximum). Dans ces conditions, nous admettons que la *durée de lancement est très brève.* Nous admettrons aussi que le cadre prend instantanément sa vitesse limite. De même, il s'arrête instantanément dès que la tension u s'annule.

2. Emploi du fluxmètre à la mesure des flux.

Relions au fluxmètre une bobine dans laquelle le flux varie de $\Delta\Phi$ *wébers* pendant le temps Δt *secondes.*

Il se produit dans la bobine une f. é. m. d'induction $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Le fluxmètre dévie à une vitesse telle que sa f. é. m. soit égale à E.

Or, lorsque sa f. é. m. est	10^{-4} V,	sa vitesse est	1	div. par seconde.
—	1 V,	—	10^4	—
—	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. V,	—	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.10^4$	—

En Δt secondes, l'aiguille se déplace donc d'un nombre de divisions d, tels que

$$d = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.10^4 \times \Delta t = \Delta\Phi.10^4.$$

En conséquence

$$\Delta\Phi = d.10^{-4}.$$

Ainsi, chaque division de fluxmètre vaut 10^{-4} *wébers* et la variation de flux dans la bobine est égale au déplacement de l'aiguille évaluée en divisions de l'échelle multipliée par 10^{-4}.

3. Emploi du fluxmètre à la mesure des quantités d'électricité.

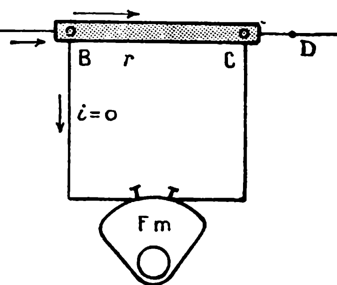


Fig. 6. — Mesure d'une quantité d'électricité au fluxmètre.

Shuntons le fluxmètre par une résistance r ($r < 20$ Ω). Soit j le courant dans AB (fig. 6). Le fluxmètre en mouvement n'est traversé par aucun courant à cause de sa f. é. m. La résistance r est traversée par le courant j et la tension aux bornes du fluxmètre est $u = r.j$. Puisque 1 volt donne une vitesse de 10^4 divisions par seconde, la vitesse de déviation du cadre est $10^4.r.j.$ divisions par seconde. Pendant le temps t, le déplacement du fluxmètre est

$$d = 10^4.r.j.t.$$

$j.t.$ est la quantité d'électricité Q en *coulombs* qui a passé de A à D au cours de l'expérience donc

$$d = 10^4 r.Q \qquad \text{ou} \qquad Q = \frac{d}{10^4.r} \textit{ coulombs.}$$

Si par exemple, $r = 10$ Ω. $Q = d.10^{-5}$ *coulombs.* 1 division vaut 10 microcoulombs

Exercices.

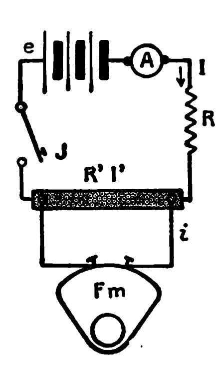
1. **La section transversale** d'un aimant droit en acier trempé est un rectangle dont les dimensions sont 30 *mm* et 10 *mm*. Avec du fil de cuivre, fin, isolé, on fabrique une bobine rectangulaire plate de 20 spires qui glisse facilement sur le barreau. On relie cette bobine aux bornes d'un fluxmètre dont chaque division correspond à 10^{-4} *wéber*.

On enfile la bobine jusqu'au milieu du barreau, on règle l'aiguille du fluxmètre au zéro de la graduation. On retire alors la bobine de l'aimant, on lui fait subir une rotation de 180° autour de son grand axe et on la ramène dans sa position initiale. L'aiguille du fluxmètre dévie de 18 divisions.

Calculer le flux et l'induction dans la section médiane du barreau.

2. On shunte par une résistance de 15 Ω un fluxmètre dont la constante est 10^{-4} *wébers* par division. Les deux bornes de l'appareil sont réunies à une bobine dans laquelle on introduit un aimant. L'aiguille du fluxmètre dévie de 30 divisions.

Calculer la quantité d'électricité qui a traversé le shunt du fluxmètre.



3. On effectue avec un fluxmètre le montage de la figure 7. R' = 1 Ω; la résistance R est réglée de façon que lorsque l'interrupteur J est fermé le courant soit égal à 1 ampère.

On ferme, puis on ouvre très rapidement l'interrupteur. Le fluxmètre dévie de 12 divisions. Calculer la durée de la fermeture de l'interrupteur.

Imaginer, sur ce principe, un dispositif pour mesurer la durée très brève du choc de deux corps métalliques.

Constante du fluxmètre : 10^{-4} *wéber* par division

4. Étudier au fluxmètre la distribution du flux à l'intérieur d'un aimant droit :

1° la bobine exploratrice est placée au milieu du barreau;

2° elle est mise sur un pôle, tout près de l'extrémité de l'aimant;

3° elle est placée face à un pôle à quelques centimètres en avant;

4° elle est placée normalement à l'aimant en touchant le barreau à égale distance des pôles.

Calculer l'induction dans chaque cas et inscrire les résultats trouvés sur un croquis respectif de l'aimant dans la région où la mesure a été faite.

5. Étudier de même un aimant en fer à cheval sans armature.

Ampèremètres et voltmètres à aimant et cadre mobile.

---

1. Examinons et dessinons un ampèremètre de contrôle[1].

L'***équipage mobile*** est visible dans l'entrefer d'un gros aimant circulaire. Il est fait d'un cadre de fil de cuivre fin, isolé à la soie, enroulé sur une carcasse circulaire en cuivre rouge (25 spires de fil de 0,4 *mm*). Ce cadre est monté sur deux pivots. Deux ressorts spiraux le rappellent

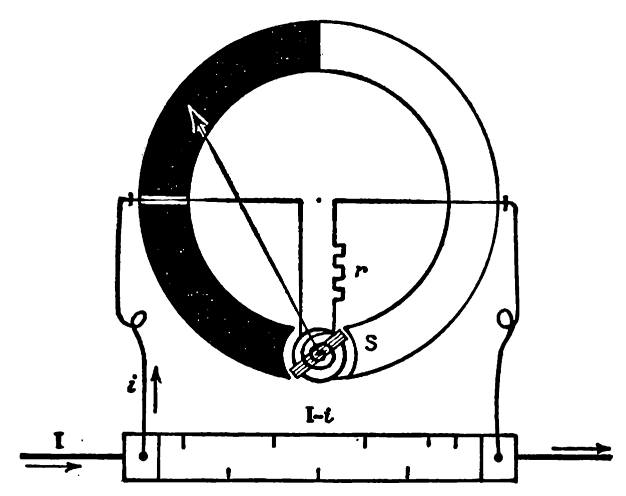


Fig. 1. — Schéma d'un ampèremètre à cadre mobile avec son shunt.

à la position de zéro et servent en même temps à amener le courant. Cet ensemble est très léger (2,5 *g*). Une longue aiguille en repère le déplacement sur une échelle graduée. En série avec le cadre, une résistance additionnelle *r* en manganine sert à régler, à la construction, la résistance de l'appareil.

Le cadre tourne dans l'entrefer très petit (3 *mm*) compris entre les pôle de l'***aimant*** circulaire et un noyau central de fer doux (fig. 1).

1. Le modèle étudié est celui du constructeur Chauvin et Arnoux. Les caractéristiques des appareils des autres constructeurs sont du même ordre de grandeur.

L'instrument est, en somme, un galvanomètre à cadre mobile portatif et plus robuste que le modèle à fils de suspension. Il est moins sensible qu'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval : pour obtenir la déviation maximum de l'aiguille, il faut 0,05 A dans le cadre. La résistance est 0,8 Ω. La tension aux bornes mesure donc 0,04 *volt* quand la déviation est maximum. L'appareil consomme alors 0,04 × 0,05 = 0,002 *watt*.

L'échelle est graduée en divisions égales. On a démontré dans la leçon précédente que les déviations du cadre d'un galvanomètre sont proportionnelles à l'intensité qui le traverse.

Le long de l'échelle graduée du cadran, un miroir reflète l'extrémité en lame de couteau de l'aiguille. L'observateur doit se placer pour que l'aiguille se superpose à l'image de l'aiguille; le rayon visuel est alors dans un plan perpendiculaire au cadran et l'observateur distingue, *sans erreur de parallaxe*, le trait de l'échelle qui se trouve à l'aplomb de l'aiguille; il peut ainsi apprécier le 1/10 de division.

2. L'ampèremètre précédent nécessite l'emploi de shunts.

Tel qu'il vient d'être décrit, l'appareil ne peut mesurer que des intensités inférieures à 0,04 A. En pratique, on ne l'emploie qu'avec un shunt pour accroître sa capacité de mesure. Un shunt est une résistance étalonnée que l'on monte en dérivation aux bornes de l'ampèremètre.

Les shunts de l'appareil étudié sont des lames de manganine sur lesquelles sont poinçonnés leur résistance et leur calibre, c'est-à-dire l'intensité dans la ligne qui correspond à la déviation totale de l'appareil quand ils sont en dérivation à ses bornes.

Par exemple, pour le shunt 10 A, quand le courant est 10 A dans la ligne, 9,95 A passent dans le shunt et 0,05 A dans le cadre mobile. Si l'échelle de l'appareil a 100 divisions, chaque division correspond à 10 : 100 = 0,1 A.

Quelle est la résistance du shunt? Elle est telle que l'intensité 9,95A donne 0,04 V à ses bornes, soit :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,04}{9,95} = 0,004\ 023\ \Omega, \text{ soit } 4\ 023 \textit{ microhms.}$$

C'est le nombre poinçonné sur la plaque du shunt[1].

Avec des shunts de 1, 10, 100, 1 000 ampères, un seul ampèremètre suffit pour toutes les intensités usuelles.

Quand on met l'appareil en circuit, l'aiguille prend sa position d'équilibre sans osciller : *l'instrument est apériodique* à cause des courants induits qui se produisent dans la carcasse en cuivre du cadre. Il ne dévie que pour un seul sens du courant et ne peut servir qu'en courant continu.

Les ampèremètres à cadre mobile sont commodes et précis; ils consom-

1. Certains constructeurs poinçonnent la résistance de l'ensemble shunt et ampèremètre, soit dans ce cas 4 000 μΩ. Il faut y prendre garde lorsqu'on utilise les shunts comme résistances étalonnées. La différence est d'ailleurs pratiquement insensible pour les shunts supérieurs à 10 ampères.

ment peu : par exemple, au maximum 0,4 *watt* avec le shunt de 10 A, 4 *watts* avec le shunt de 100; ce sont les meilleurs ampèremètres industriels. Actuellement, la plupart des constructeurs donnent aux milliampèremètres de leurs ampèremètres de contrôle une résistance totale de 1 *ohm;* la déviation totale de l'aiguille des 100 divisions de l'échelle est produite par un courant de 0,1 *ampère.* La tension entre les bornes des shunts est alors de 0,1 *volt.* Les shunts sont dits réglés à 0,1 *volt,* 0,1 *ampère.*

3. Voltmètre à cadre mobile

Le voltmètre de contrôle du même fabricant est d'une construction analogue à celle de l'ampèremètre. Le cadre mobile a plus de spires et le fil est plus fin (140 spires, fil de 0,06 *mm,* résistance 75 *ohms*). Un courant 5 *milliampères* suffit pour que l'aiguille dévie de toute l'échelle graduée.

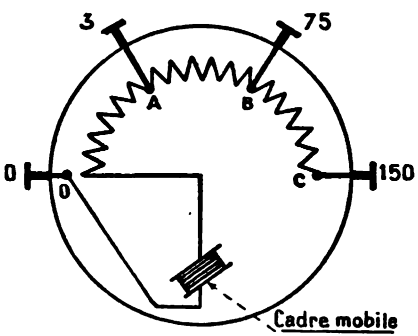


Fig. 2. — Schéma de la partie électrique d'un voltmètre à trois sensibilités :
Résistance OA = 600 Ω
OB = 15 000 Ω
OC = 30 000 Ω

En série avec le cadre sont des bobines de maganine d'une résistance telle que le courant soit 0,005 A pour la tension maximum à mesurer. Ainsi, pour un voltmètre 150 *volts,* la résistance totale, R = U : I = 150 : 0,005 = 30 000 *ohms,* comprend 75 *ohms* de cadre et 29 925 *ohms* de résistance additionnelle (fig. 3, page 71).

Pour donner à l'appareil des sensibilités différentes, par exemple 3 *volts,* 75 *volts,* correspondant à la déviation totale de l'aiguille, des prises sont faites à 3 : 0,005 = 600 Ω, 75 : 0,005 = 15 000 Ω, aboutissant à des bornes marquées 3 et 75 *volts* sur le boîtier de l'appareil; la borne de gauche est commune à toutes les sensibilités.

Fig. 3. — Boîte de contrôle. Elle comporte un voltmètre à plusieurs sensibilités et un ampèremètre avec une série de shunts.

Le voltmètre est *apériodique* comme l'ampèremètre; sa précision est la même; sa consommation minime (0,015 *watt* pour 3 *volts,* 0,75 *watt* pour 150 *volts*) ne modifie pas de façon appréciable le circuit sur lequel on l'installe.

4. Boîtes de contrôle.

On réunit dans une même caisse, que l'on nomme *boîte de contrôle*, un ampèremètre avec une série de shunts et un voltmètre à sensibilités multiples (fig. 3).

Une composition usuelle est la suivante : shunts d'ampèremètre : 1 — 3 — 10 — 30 — 100 — 300 — 1 000 *ampères;* sensibilités de voltmètre : 3 — 75 — 150 — 300 — 600 *volts*.

On peut ainsi mesurer une puissance atteignant 600 × 1 000 = 600 000 *watts*.

Remarque. — Certains constructeurs utilisent le même appareil de mesure comme ampèremètre et comme voltmètre. — Comme ampèremètre, il est monté en dérivation sur des shunts; comme voltmètre, il est mis en série avec des résistances additionnelles. — La boîte de contrôle est alors formée d'un seul appareil de mesure, d'un jeu de shunts et d'un jeu de résistances additionnelles.

5. Appareils de tableaux.

Les appareils à cadre mobile s'emploient aussi sur les tableaux de distribution soignés. L'équipage mobile est moins léger que dans les appareils de contrôle. La tension aux bornes des ampèremètres est en général 0,1 *volt;* le shunt est logé à l'intérieur de l'appareil.

Exercices.

1. Calculer les résistances de shunts 1 — 3 — 10 — 30 — 100 — 600 ampères de l'ampèremètre de contrôle Chauvin et Arnoux. L'appareil sans shunt a une résistance de 0,8 ohms et dévie de toute l'échelle pour une intensité de 0,05 A.

2. Un voltampèremètre à cadre mobile, construction AOIP, peut être employé en voltmètre ou en ampèremètre. Sur le cadran sont imprimées les indications suivantes :
0,1 volt : tension aux bornes pour la déviation totale;
0,01 ampère : intensité produisant la déviation totale;
R = 10 ohms : résistance de l'appareil.

Quelle résistance faut-il placer en série avec l'appareil pour en faire un voltmètre pouvant mesurer 150 volts?

Quelle résistance faut-il donner au shunt à placer à ses bornes pour en faire un ampèremètre pouvant mesurer 100 A?

3. L'aiguille d'un milliampèremètre dévie des 100 divisions de l'échelle quand l'appareil est traversé par un courant de 100 *milliampères*, la tension entre les bornes est alors 0,1 *volt*. On monte entre les bornes :

1° soit deux shunts du calibre de 10 A en les couplanten série avec une barrette de résistance négligeable;

2° soit deux shunts du calibre de 10 A en les couplant en parallèle avec deux barrettes de résistance négligeable;

Quel est dans chaque cas le calibre de l'ampèremètre?

Les réponses faites sont-elles d'une exactitude rigoureuse?

Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques et électrodynamiques. Wattmètres électrodynamiques.

1. Appareils ferromagnétiques.

Ils sont d'une construction plus simple et plus robuste que les appareils à cadre mobile et aimant.

Une bobine A (fig. 1) est traversée par le courant. Elle a peu de spires de gros fil s'il s'agit d'un ampèremètre, beaucoup de spires de fil fin s'il s'agit d'un voltmètre. Elle aimante une palette de fer doux fixe *f* et une palette mobile *f'* fixée à l'aiguille indicatrice. Les deux palettes se repoussent d'autant plus que le courant est plus intense. Deux ressorts spiraux rappellent l'aiguille vers sa position de départ. L'appareil est gradué à l'aide d'un appareil étalon.

Fig. 1. — Schéma d'un ampèremètre ferromagnétique ou à fer doux. La bobine A est coupée horizontalement. L'amortisseur n'est pas représenté.

Les divisions de l'échelle ne sont pas équidistantes; elles sont très serrées au début et l'instrument n'est pas utilisable dans le premier cinquième de son étendue de mesure.

Les appareils à fer doux ont une consommation assez élevée. Un ampèremètre ordinaire dévie de toute son échelle pour un courant de 10A. La tension à ses bornes est alors 0,3 V et sa consommation 3 W. Pour des intensités plus grandes, on emploie des shunts donnant 0,3V aux bornes de l'ensemble ampèremètre-shunt pour l'intensité maximum à mesurer. Un voltmètre à fer doux absorbe 0,05A pour sa déviation maximum.

Ces appareils dévient dans le même sens, quel que soit le sens du courant. En inversant le sens du courant, on inverse la polarité des extrémités des lames de fer doux fixe et mobile, leur répulsion reste la même. Les ampèremètres et voltmètres électromagnétiques peuvent être employés avec du courant alternatif comme avec du courant continu et, si l'hystérésis du fer est négligeable, la même graduation convient dans les deux cas.

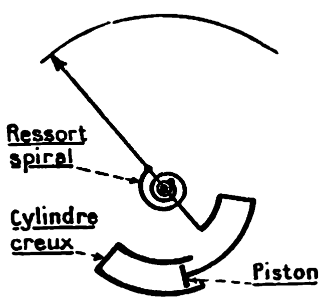


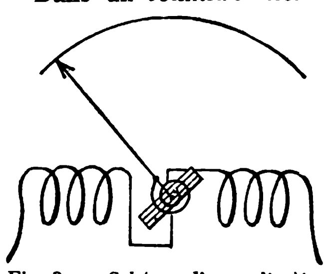
Fig. 2. — Amortisseur à air d'un appareil ferromagnétique.

Tels qu'ils viennent d'être décrits, ils ne sont pas apériodiques. Si l'intensité ou la tension qu'ils doivent mesurer ne sont pas très constantes, l'aiguille oscille fortement et les lectures sont sans précision. L'un des moyens employés pour amortir les oscillations consiste à adapter à l'aiguille un piston très léger qui se déplace, sans en toucher les parois, dans un cylindre creux dont le fond est fermé. L'air, refoulé ou aspiré par le piston, doit passer dans l'espace très faible laissé par le jeu du piston dans le cylindre (fig. 2) et les oscillations s'arrêtent très rapidement.

Quand ils sont de construction soignée, les appareils électromagnétiques donnent des indications exactes à 1/100 près de la graduation maxima. Il en est de médiocres pour lesquels les erreurs atteignent 10 %.

2. Appareils électrodynamiques.

Dans un *voltmètre électrodynamique*, une bobine fixe agit sur une bobine mobile montée sur pivots et rappelée par deux spiraux (fig. 3). Les deux bobines sont parcourues par un courant proportionnel à la tension à mesurer. Le couple produisant la déviation dépend donc du carré de cette tension. Aussi l'échelle de l'appareil n'est-elle pas divisée en parties égales, les divisions sont très serrées au voisinage du zéro et les lectures ne sont commodes qu'à partir du cinquième de l'échelle.


Fig. 3. — Schéma d'un voltmètre électrodynamique.

La déviation ne dépend pas du sens du courant. Un voltmètre électrodynamique peut être employé avec du courant alternatif comme avec du courant continu.

Il n'est pas apériodique. On peut amortir le cadre avec un amortisseur à air.

Un tel voltmètre dévie de toute sa graduation pour un courant de

75 *milliampères*. On obtient deux sensibilités en couplant les deux moitiés de la bobine fixe, soit en série, soit en parallèle. Un voltmètre construit pour 30 *volts*, par exemple, peut, avec des résistances additionnelles, mesurer jusqu'à 600 *volts*.

Un *ampèremètre électrodynamique* est de construction analogue, mais, comme la bobine mobile doit être très légère et faite de fil fin, elle ne peut être traversée que par un courant de faible intensité : elle est montée sur un shunt placé à l'intérieur de l'appareil (fig. 4).

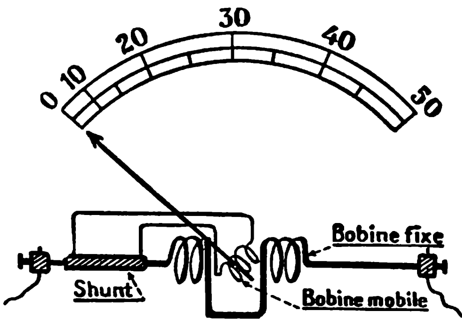


Fig. 4. — Schéma d'un ampèremètre électrodynamique.

3. Wattmètre électrodynamique.

Cet instrument sert à mesurer la puissance débitée dans une installation ou absorbée par un appareil : P = UI.

Une bobine A, fixe (fig. 5), à gros fil, dite *bobine d'intensité*, est parcourue par le courant I. Aux bornes d'une bobine à fil fin B, mobile sur pivots, rappelée par des ressorts spiraux, dite *bobine de tension*, en série avec des résistances additionnelles, est appliquée la tension U. Le couple qui agit sur la bobine mobile est proportionnel à I et à U, donc au produit UI, c'est-à-dire à la puissance P, fournie au récepteur.

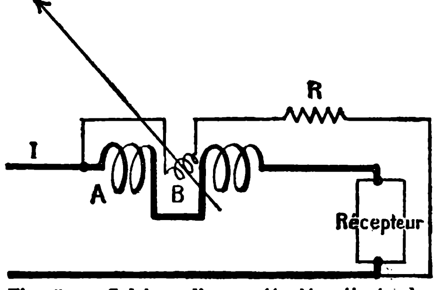


Fig. 5. — Schéma d'un wattmètre électrodynamique.
A, *bobine d'intensité*, est fixe.
B, *bobine de tension*, est mobile.

On donne à la bobine fixe une forme telle que le couple ne dépende pas de la position de la bobine mobile, mais seulement du produit UI.

Le couple antagoniste des spiraux est proportionnel à l'angle α de déviation. Quand il y a équilibre, les deux couples sont égaux: la déviatiou α est proportionnelle à la puissance à mesurer.

L'échelle, sous l'aiguille solidaire de la bobine mobile, est donc divisée en parties égales.

Un dispositif amortisseur à air rend l'appareil presque apériodique.

Les wattmètres, employés dans les mesures industrielles, compor-

tent plusieurs sensibilités de tension, réalisées avec des résistances additionnelles et deux sensibilités d'intensité obtenues en constituant la bobine fixe par deux conducteurs bobinés ensemble que l'on peut coupler en série ou en parallèle au moyen de fiches (fig. 6).

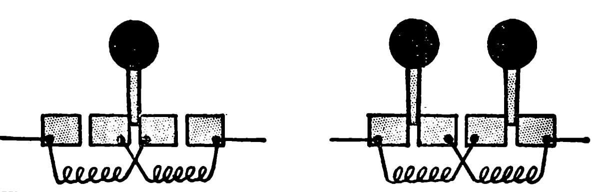


Fig. 6. — Couplage en série et en parallèle des deux bobines d'intensité d'un wattmètre.

Les wattmètres ne sont pas nécessaires dans les mesures de puissances en courant continu : un ampèremètre et un voltmètre suffisent, mais ils sont indispensables en courant alternatif.

Des *wattmètres enregistreurs*, dont l'aiguille, munie d'une plume encrée, se déplace sur une feuille de papier qu'un mouvement d'horlogerie entraîne à vitesse constante, sont fréquemment employés sur les tableaux de distribution pour inscrire les variations de la puissance produite ou consommée au cours d'une journée de travail.

4. Ampèremètres et voltmètres thermiques.

Le principe de ces appareils a été indiqué dans la 7e leçon de ce cours : le courant à mesurer, ou une intensité qui lui est proportionnelle, traverse un fil qui s'échauffe et s'allonge; cet allongement est transmis à une aiguille par un dispositif amplificateur.

Ces instruments qui fonctionnent avec du courant continu ou du courant alternatif ne sont employés en pratique qu'avec du courant alternatif. Ils sont fragiles, peu fidèles à cause des modifications de structure du fil chaud (platine-argent ou bronze) et surtout ils consomment beaucoup. L'ampèremètre thermique Chauvin-Arnoux dévie de toute son échelle pour une intensité de 2,5 A sous 0,3 V et consomme, compte tenu du shunt, 3 *watts* pour 10 A, 30 *watts* pour 100 A. Le voltmètre dévie de toute son échelle pour 3 V à ses bornes en absorbant 0,18 A.

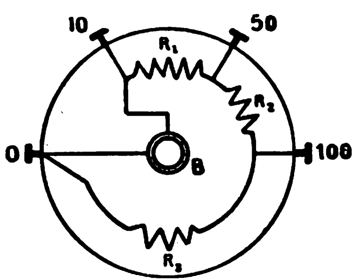


Fig. 7. — Schéma d'un ampèremètre à trois sensibilités (probl. n° 3).

Exercices.

1. Aux bornes d'une dynamo dont la f. é. m. est 440 volts, on monte en série un voltmètre de 300 volts dont la résistance est 60 000 ohms,

et un voltmètre de 150 volts dont la résistance est 30 000 ohms. Quelles sont les indications des deux appareils?

2. Un voltmètre à cadre mobile dont l'aimant s'est affaibli donne des indications erronées. Les mesures faites avec cet appareil sont-elles fausses par excès ou par défaut?

3. Un ampèremètre qui possède trois sensibilités : 10 A, 50 A, 100 A, est construit suivant le schéma de la figure 7. La bobine B de l'équipage mobile a une résistance de 9,9 Ω ; elle doit être parcourue par un courant de 0,1 A pour que l'aiguille dévie de toute la graduation de l'appareil.

Calculer les résistances R_1, R_2, R_3.

4. On a effectué une série de mesures avec un ampèremètre gradué de 0 à 100 et un shunt de 100 ampères.

On aurait dû employer un shunt de 0,1 V, c'est-à-dire donnant une d. d. p. de 0,1 volt à ses bornes quand l'intensité du courant qui le traverse est 100 ampères, mais on s'est servi, par erreur, d'un shunt de 0,3 volt.

Comment faut-il corriger les lectures faites?

5. On dispose d'un voltmètre dont le calibre est 300 volts et la résistance 60.000 Ω. Pour mesurer une tension que l'on suppose dépasser 300 volts, on met en série avec le voltèmtre une résistance de 20.000 Ω. La lecture faite est 280. Quelle est la tension mesurée?

6. Un ampèremètre dont la résistance est égale à 9,5 ohms est gradué de 0 à 1A. On désire utiliser cet appareil entre 0 et 20 A. Déterminer la résistance du shunt qu'il convient d'intercaler entre ses bornes.

Calculer l'intensité du courant qui traverse ce shunt lorsque l'intensité du courant total (courant à mesurer) est égale à 10 A. Quelle est alors la quantité de chaleur dégagée par minute dans le shunt par le passage du courant (une calorie équivaut à 4,18 joules)?

On suppose que le shunt est constitué par un fil de cuivre qui s'échauffe notablement par suite du passage du courant. La résistance d'un fil de cuivre augmente des 0,004 de sa valeur pour une élévation de température de 1°. Qu'en résulte-t-il pour les indications de l'ampèremètre? On indiquera, par exemple, l'ordre de grandeur de l'erreur commise si l'élévation de température est égale à 10°, en supposant que la résistance de l'ampèremètre reste invariable.

Mesure industrielle des résistances.

1. Rappel d'une leçon[1] sur la mesure des résistances.

Supposons que la salle d'essais dispose de 40 A sous 220 V et possède la boîte de contrôle décrite dans la 47e leçon.

a) Résistances moyennes.

Dans la résistance à mesurer X, on fait passer un courant d'intensité I

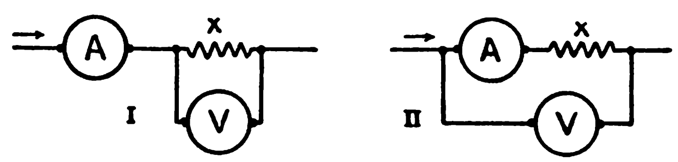


Fig. 1. — Mesure d'une résistance avec un ampèremètre et un voltmètre. Le montage I convient pour des résistances de quelques ohms ; le montage II pour des résistances de quelques centaines d'ohms.

mesurée avec l'ampèremètre; avec le voltmètre on mesure la tension U aux bornes de la résistance et l'on calcule

$$X = \frac{U}{I} \text{ ohms.}$$

1° Avec le shunt 1 A, on mesurera dans d'assez bonnes conditions de précision une intensité de l'ordre de 0,1 A. Si la tension est 220 volts, la résistance sera 2 200 Ω.

2° En employant la sensibilité 3 V du voltmètre, on mesurera facilement 0,4 V; si l'intensité est 40 A, la résistance sera 0,01 Ω.

Il est donc possible, avec l'installation supposée, de mesurer par la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre des résistances entre 0,01 et 2 200 Ω, à condition que ces résistances puissent supporter les intensités indiquées.

b) Faibles résistances.

On les compare à la résistance d'un shunt de l'ampèremètre. Par exemple, la résistance du shunt 100 A est 400,2 *microhms*. On met en série

1. 10e Leçon.

avec ce shunt, la résistance très faible à mesurer X (fig. 2). On fait passer dans le circuit l'intensité maximum qu'il peut supporter. On connecte l'ampèremètre successivement aux bornes du shunt (il dévie de *s* divisions) et aux bornes de la résistance à mesurer (la déviation est alors *d*). Ces déviations sont proportionnelles à la chute de tension dans le shunt et dans la résistance X, donc aux résistances :

$$\frac{X}{400{,}2} = \frac{d}{s}$$

$$X = 400{,}2 \times \frac{d}{s} \text{ microhms.}$$

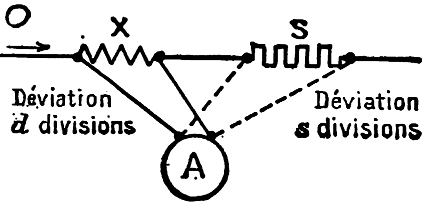


Fig. 2. — Mesure d'une faible résistance X en la comparant à la résistance S d'un shunt d'ampèremètre.

Dans les conditions d'installation supposées, il est possible de mesurer ainsi une résistance de 50 *microhms*, si elle peut supporter 40 A.

c) Grandes résistances.

On les compare à la résistance d'un voltmètre qui, par exemple, pour la sensibilité 300 *volts*, a une résistance de 60 000 *ohms*.

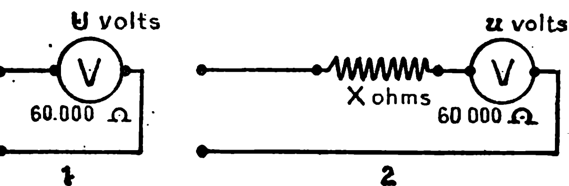


Fig. 3. — Mesure d'une grande résistance avec un voltmètre. Chaque voltmètre porte l'indication de sa résistance: ici, 60 000 ohms.

1° On mesure la tension du réseau (fig. 3, 1); soit *U volts*.

2° On branche aux bornes du réseau la résistance à mesurer X en série avec le voltmètre (fig. 3, 2); on lit *u volts*.

Dans cette deuxième expérience, l'intensité du courant est égale, d'une part à $\frac{U}{X + 60\,000}$, d'autre part à $\frac{u}{60\,000}$. Donc,

$$\frac{U}{X + 60\,000} = \frac{u}{60\,000}$$

d'où l'on tire :

$$X = \frac{60\,000\,(U - u)}{u}.$$

On pourra ainsi mesurer jusqu'à 500 000 Ω. Cette méthode est employée surtout pour mesurer la résistance d'isolement entre les différents enroulements des machines électriques.

2. Mesure pratique des résistances très grandes : ohmmètre.

Un modèle d'ohmmètre, qui sert surtout aux monteurs électriciens, se compose de deux cadres solidaires, perpendiculaires l'un à l'autre,

montés sur pivots dans le champ d'un fort aimant, sans spiraux de rappel au zéro. L'un de ces cadres A (fig. 4) est en dérivation sur une magnéto qui peut fournir une tension de 250 volts, variable d'ailleurs avec la vitesse de rotation. L'autre cadre B est en série avec la résistance à mesurer et l'ensemble est aussi en dérivation sur la magnéto (fig. 5).

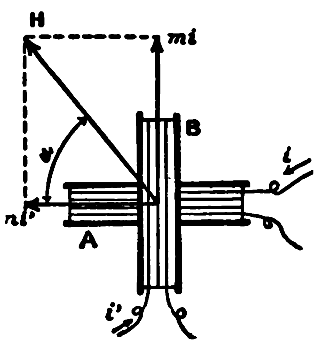


Fig. 4. — Composition des champs de l'équipage mobile d'un ohmmètre.

Soit U la tension de la magnéto.

Dans la bobine A, il passe un courant i proportionnel à U, soit $i = k\text{U}$.

Dans la bobine B, le courant i' a pour valeur $i' = \frac{\text{U}}{\text{X}}$ car la résistance du cadre B est négligeable par rapport à X.

Les *inductions produites* par les deux bobines sont respectivement proportionnelles à i et à i', soient mi et ni' leurs valeurs. L'induction résultante H, obtenue par la règle du parallélogramme, fait avec A un angle α tel que :

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{mi}{ni'} = mk\text{U} : n\frac{\text{U}}{\text{X}} = \frac{mk}{n}\text{X} = k'\text{X}.$$

Puisque l'ensemble des deux cadres tourne librement, la résultante H s'oriente dans la direction du champ de l'aimant.

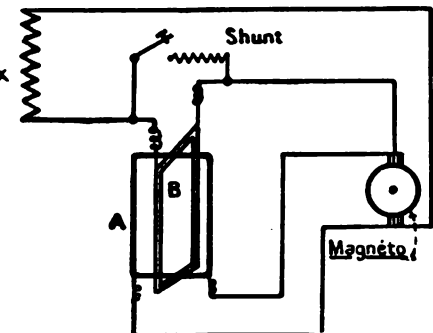


Fig. 5. — Schéma d'un ohmmètre à magnéto à deux sensibilités. L'aimant n'est pas représenté.

Cette position d'équilibre est indépendante de U, c'est-à-dire de la vitesse de la magnéto et *ne dépend que de la résistance X*. Une aiguille, solidaire de l'équipage mobile, repère la position d'équilibre sur un cadran gradué en milliers d'ohms et mégohms.

Les ohmmètres de monteurs possèdent souvent deux sensibilités : 0-5 *mégohms* et 0-50 *mégohms*. Pour obtenir la sensibilité 0-50 *mégohms*, on shunte au $\frac{1}{10}$ la bobine en série avec la résistance à mesurer en appuyant sur un interrupteur à bouton placé à côté du cadran de l'appareil (fig. 5).

Cet ohmmètre est employé surtout pour la mesure des résistances d'isolement des installations, c'est-à-dire :

1° de la résistance entre les deux conducteurs, toutes lampes et appareils d'utilisation enlevés,

2° de la résistance entre l'installation et la terre, tous les appareils étant enclenchés.

Exercices.

1. Pour mesurer une grande résistance par la méthode du voltmètre, on dispose de courant continu 110 volts et l'on peut choisir entre trois voltmètres 150 volts, l'un à cadre mobile, un autre électromagnétique et le troisième thermique. Lequel de ces appareils convient-il d'employer?

2. Pour mesurer les résistances x et y d'isolement par rapport à la terre des deux fils B et C d'une distribution électrique à courant continu sous tension, avec un voltmètre dont la résistance intérieure est $R = 20\,000\ \Omega$, on fait les trois mesures suivantes :

1° tension entre B et C : $U = 115$ *V*.

2° tension entre B et la terre : $u = 75$ *V*,

3° tension entre C et la terre : $v = 25$ *V*.

Calculer les résistances x et y.

3. L'aiguille d'un milliampèremètre dévie des 100 divisions de l'échelle quand l'instrument est traversé par un courant de 100 *milliampères*, la tension aux bornes de l'appareil est alors 0,1 *V*. Calculer, en microh/ms, avec quatre chiffres significatifs, la résistance des shunts donnant l'ampèremètre un calibre de 2 — 10 — 20 — 50 ampères.

Ces shunts conviennent-ils pour tous les milliampèremètres réglés à 0,1 *volts*, quelle que soit leur consommation?

Mesure précise des résistances.

Par la méthode du pont de Wheatstone, dans les laboratoires et les salles d'essais industriels, on mesure des résistances comprises entre 0,01 ohm et 1 mégohm en employant seulement comme source de courant un élément Leclanché ou un élément d'accumulateur fournissant une intensité de quelques millièmes d'ampères. Une intensité aussi faible n'échauffe pratiquement pas les résistances.

1. Principe du pont de Wheatstone.

Trois résistances connues *a*, *b*, R et la résistance à mesurer X sont disposées suivant les côtés d'un losange ABDC (fig. 1). Dans une diagonale AD est placée une pile; dans l'autre, un galvanomètre formant pont entre B et C. On dit que *le pont est en équilibre quand le galvanomètre n'est traversé par aucun courant.*

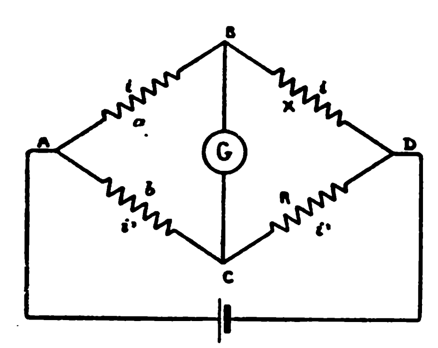


Fig. 1. — Montage dit pont de Wheatstone.

Si *i* est l'intensité dans *a*, c'est aussi l'intensité dans X; l'intensité dans *b* étant *i'*, l'intensité dans R est aussi *i'*. Les points B et C sont au même potentiel. La chute de tension dans AB est *ai*, dans AC, *bi'* donc

$$ai = bi' \qquad (1)$$

La chute de tension dans BD est X*i*, dans CD, R*i'*, donc

$$Xi = Ri' \qquad (2)$$

En divisant (1) et (2) membre à membre, on obtient

$$\frac{a}{X} = \frac{b}{R}$$

ou

$$\boxed{X = \frac{a}{b} R} \qquad (3)$$

a* et *b sont appelées *résistances de proportion.*

Dans la relation (3) n'intervient aucun facteur dépendant de la pile ou du galvanomètre.

Dans le montage, on peut permuter pile et galvanomètre, la relation d'équilibre n'est pas changée.

2. Boîte à pont.

Description. — **Observons la boîte à pont, modèle industriel du constructeur Carpentier et dessinons-en le schéma (fig. 2).**

Elle est faite de trois rangées de résistances à fiches.

1re *Rangée.* De part et d'autre du point de bifurcation A, trois résistances de 10, 100, 1 000 Ω sont les résistances de proportion. On peut donc donner au rapport $\frac{a}{b}$ les valeurs 0,01 — 0,1 — 1 — 10 — 100.

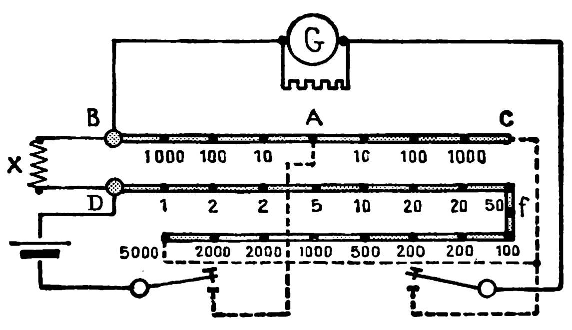
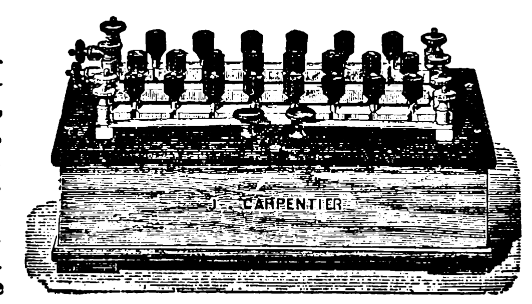


Fig. 2. — Schéma d'une boîte à pont. Les connexions en pointillé sont réalisées dans la boîte par le constructeur. Les connexions en trait plein sont à faire par l'opérateur. Dans le modèle industriel, les résistances de la boîte sont étalonnées à 1 : 500 près de leur valeur.

2e et 3e *Rangées.* Seize résistances de 1, 2, 2, 5, — 10, 20, 20, 50, — 100, 200, 200, 500, — 1 000, 2 000, 2 000, 5 000 *ohms* servent à établir la résistance R. Cette résistance, variable ohm par ohm, est donc comprise entre 1 *ohm* et 11 110 *ohms*. Une fiche de coupure *f* permet de donner à R une valeur infinie (fig. 2).



Cliché Carpentier.

Fig. 3. — Vue d'une boîte à pont. (Ce modèle diffère légèrement de celui qui est décrit dans le texte.)

Une clé, constituée par un ressort sur lequel on appuie avec le doigt, ferme le circuit de la pile, une autre, celui du galvanomètre.

Emploi. — Soit à mesurer la résistance, à froid d'une lampe de

40 *watts*. 110 *volts*. La méthode de l'ampèremètre et du voltmètre ne peut être utilisée puisqu'un courant de moins d'un demi-ampère porte la lampe à l'incandescence. Il faut recourir à la boîte à pont.

Choisissons 100 et 1 000 *ohms* pour les résistances de proportion :

$$\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$$

Shuntons le galvanomètre pendant les premiers tâtonnements pour éviter de le détériorer par un courant trop intense quand le pont est très déséquilibré.

Puis essayons méthodiquement de constituer la résistance R qui équilibre le pont en commençant par les résistances les plus grandes de la boîte.

Nous trouvons finalement que pour 582 *ohms* le galvanomètre dévie dans un sens et pour 583 *ohms* en sens contraire.

La résistance cherchée est donc comprise entre

$$582 \times 0{,}1 = 58{,}2 \text{ ohms et } 583 \times 0{,}1 = 58{,}3 \text{ ohms.}$$

Remarque. — On démontre que le maximum possible de précision dans les mesures faites avec la boîte à pont est obtenu quand les quatre résistances X, R, *a* et *b* sont du même ordre de grandeur. La méthode convient donc surtout pour les résistances dites moyennes comprises entre 1 ohm et quelques milliers d'ohms.

3. Pont à fil (ou à corde).

Un fil fin résistant AB est tendu le long d'une règle graduée (fig. 4). Les deux extrémités de ce fil sont réunies par une bande de cuivre de résistance négligeable présentant deux coupures en CD et EF. On connecte la résistance à mesurer X entre les bornes C et D et une résistance connue R entre E et F. Un galvanomètre G est relié à une borne H entre les résistances X et R et à un contact M glissant sur le fil. En A et B, on branche une pile Leclanché.

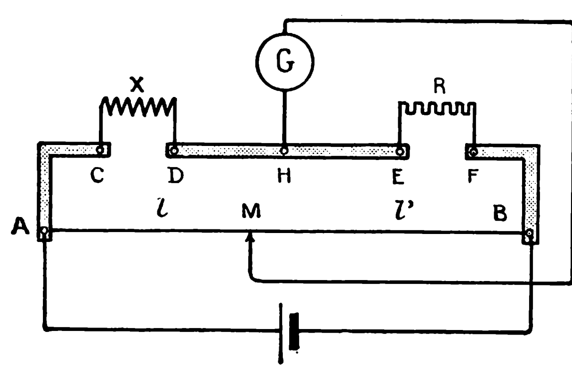


Fig. 4. — Schéma d'un pont à fil.

On déplace le curseur mobile jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro.

Soient l et l' les longueurs du fil de part et d'autre du curseur, r la résistance de ce fil par unité de longueur. Le pont est en équilibre, donc

$$X = \frac{lr}{l'r} R = \frac{l}{l'} R.$$

La mesure est précise si l et l' ne sont pas très différents. Il convient donc de choisir R voisin de X.

Remarque. — Dans la boîte à pont, on se fixe le rapport $a : b$ et l'on fait varier R pour mettre le pont en équilibre. Avec le pont à fil, c'est la résistance R qui est fixe, on réalise l'équilibre en faisant varier le rapport $a : b$.

4. Pour mesurer de très faibles résistances, on utilise la méthode du double pont de Thomson.

Dans le montage d'une résistance à mesurer, soit avec une boîte à

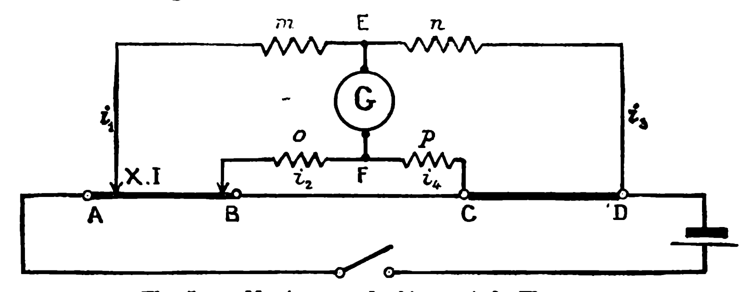


Fig. 5. — Montage en double pont de Thomson.

pont, soit avec un pont à fil, la résistance des contacts s'ajoute à celle du conducteur étudié. Cette addition est sans importance s'il s'agit de mesurer une résistance de grandeur moyenne, mais dans le cas d'une résistance très faible, de l'ordre des résistances des contacts, les résultats de la mesure en sont faussés.

Le double pont de Thomson élimine les résistances de contact.

Principe de la méthode. On place en série la résistance à mesurer X et une résistance R (fig. 5). On y fait passer un courant assez intense.

Deux dérivations réunissent X et R. Quatre résistances connues m, n, o, p sont disposées dans ces dérivations; un galvanomètre est placé entre les points E et F.

Les résistances m, n, o, p, sont choisies de manière que

$$\frac{m}{n} = \frac{o}{p}.$$

La valeur commune de ces rapports peut égaler 0,01, 0,1, 1, 10 ou 100.

Quand aucun courant ne passe dans le galvanomètre G on a :

$$\frac{X}{R} = \frac{m}{n} = \frac{o}{p}$$

En effet, soit :

I le courant qui traverse X,
I' le courant qui traverse R,
i_1 et i_3 les courants dans m et n,
i_2 et i_4 les courants dans o et p.

Quand il n'y a pas de courant dans G, $i_1 = i_3$, $i_2 = i_4$, donc : $I = I'$ et $U_E - U_F = o$.

On a, dans ce cas :

$$U_A - U_E = mi_1, \quad U_E - U_D = ni_1$$
$$U_B - U_F = oi_2, \quad U_F - U_C = pi_2$$

d'où :

$$\frac{U_A - U_E}{U_E - U_D} = \frac{m}{n}, \quad \frac{U_B - U_F}{U_F - U_C} = \frac{o}{p}$$

et puisque

$$\frac{m}{n} = \frac{o}{p}:$$

$$\frac{U_A - U_E}{U_E - U_D} = \frac{U_B - U_F}{U_F - U_C} = \frac{m}{n}.$$

En faisant la différence des deux premiers numérateurs et des deux premiers dénominateurs et tenant compte que $U_E - U_F = o$:

$$\frac{U_A - U_B}{U_C - U_D} = \frac{m}{n}.$$

soit

$$\frac{XI}{RI} = \frac{m}{n}.$$

D'où :

$$\frac{X}{R} = \frac{m}{n}.$$

Appareil. — La résistance connue R est une barre de 0,01 *ohm* placée le long d'une règle divisée en 100 parties égales, chaque partie a ainsi une résistance de 0,0001 *ohm* (fig. 6).

Une longueur précise est déterminée sur la résistance X, qui est en général un barreau, en y appliquant deux couteaux d'où partent les dérivations.

Les résistances *m*, *n*, *o*, *p* sont disposées dans une boîte et l'on fait varier le rapport $\frac{m}{n}$ en tournant la manette M.

Un élément d'accumulateur fournit un courant que l'on règle avec un rhéostat à environ 5 ampères.

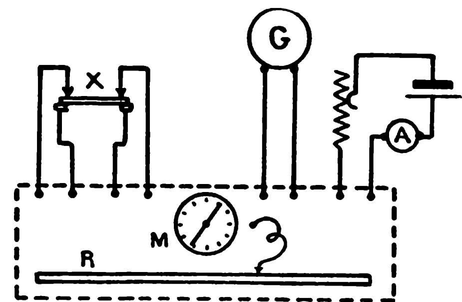


Fig. 6. — Schéma d'un appareil double pont de Thomson.

Exercices.

1. Les six résistances de proportion d'une boîte à pont peuvent se combiner deux à deux de 9 façons différentes.

Écrire ces combinaisons. Indiquer pour chacune d'elles :

1° entre quelles valeurs est comprise la résistance que l'on peut mesurer;

2° l'ordre de grandeur de la résistance de protection à mettre en série avec un élément d'accumulateur de 2 *volts* pour qu'il ne débite pas dans la boîte plus de 0,002 *ampère*.

2. Un pont de Wheatstone, formé d'une résistance AB = 10 *ohms*, d'une résistance AC = 100 *ohms* et d'une boîte de résistance R, est monté pour la mesure d'une résistance BD = 40 *ohms* (fig. 1).

1° Quelle est la valeur de la résistance R lorsque le pont est équilibré?

2° Quelle est la valeur de la résistance x qu'il faut monter en série avec la pile P de f. é. m. 6 volts et de résistance intérieure négligeable pour que, le pont étant équilibré, l'intensité du courant ne dépasse pas 20 *milliampères* dans aucune des résistances AB, AC et CB du pont?

Concours des Vérificateurs des I. E. M. des P. T. T.

3. Pour étudier un échantillon d'aluminium on mesure, par la méthode du *double pont de Thomson*, la résistance, à diverses températures, d'une tige cylindrique de ce métal dont le diamètre est 2,55 *mm*.

Le barreau est plongé dans du pétrole dont on peut faire varier la température. Sa longueur entre les couteaux de contact est 30,5 *cm* à O °C. Sa dilatation est négligeable.

A 0° pour un rapport $m : n = 10$, on a R = 0,0002 *ohm*. Calculer la résistivité de cet échantillon d'aluminium. Est-ce de l'aluminium pur?

A 50° pour un rapport $m : n = 1$, on a R = 0,0024 *ohm*. Calculer le coefficient de température de ce métal.

4. Une tension constante U est appliquée entre les sommets A et D d'un *pont de Wheatstone* constitué par trois résistances égales $a = b = R$ et une résistance variable x placée en BD.

Déterminer la loi de variation de la différence de potentiel v entre B et C en fonction de x

Le galvanomètre est débranché des points B et C.

Application numérique :

$$a = b = R = 10 \text{ ohms} \quad U = 20 \text{ volts}.$$

Tracer le graphique de la variation de v quand x varie de 0 à 20 *ohms*.

3e PARTIE

COURANT ALTERNATIF

13. NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE

51e LEÇON

Phénomènes fondamentaux.

I. Les corps s'électrisent par frottement.

1. Tous les corps s'électrisent par le frottement.

Expériences. — *a*) Un bâton d'*ébonite* que nous frottons sur du drap attire de petits morceaux de papier (fig. 1).

L'ébonite frottée peut donc produire un petit travail mécanique; elle est devenue une source d'énergie: *on dit qu'elle est électrisée.*

De même, un bâton de *verre*, de *soufre*, de *résine* s'électrise par le frottement. Nous savons que ces corps sont mauvais conducteurs de l'électricité; nous dirons aussi que ce sont des *isolants*.

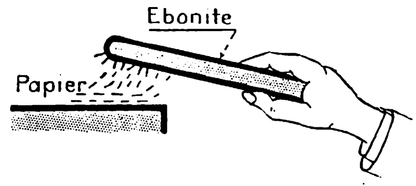


Fig. 1. — Un bâton d'ébonite frotté sur du drap attire les morceaux de papier : il est *électrisé*.

b) Un cylindre ou un plateau de *métal*, de laiton par exemple, qui sont bons conducteurs de l'électricité, s'électrisent aussi quand on les frappe légèrement avec une peau de chat, mais seulement s'ils sont supportés ou tenus par l'intermédiaire d'un corps isolant : on dit alors qu'ils sont isolés (fig. 2).

L'électrisation des corps par frottement est donc un phénomène général.

c) Un corps non électrisé est dit à l'*état neutre*.

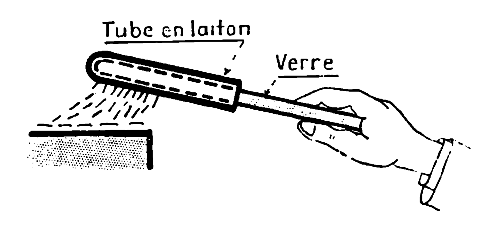


Fig. 2. — Le laiton frotté sur du drap *s'électrise* s'il est tenu par l'intermédiaire d'un isolant.

2. Le pendule électrique permet de reconnaître facilement si un corps est électrisé.

Un pendule électrique (fig. 3 et 4) se compose d'un corps très léger suspendu par un fil fin conducteur : par exemple, une petite balle en moelle de sureau, noircie de plombagine pour en rendre la surface conductrice et suspendue par un fil de lin à une potence en métal.

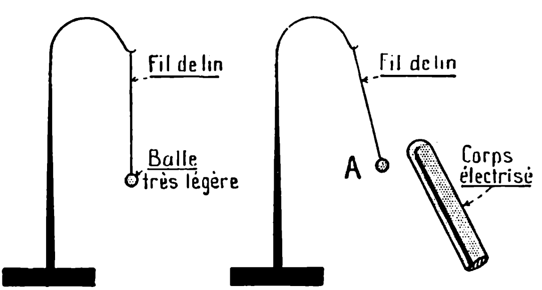


Fig. 3. — Pendule électrique. La balle A est attirée par le corps électrisé.

Fig. 4. — Représentation simplifiée ou schéma d'un pendule électrique.

Expériences. — Approchons de la balle un corps non électrisé; elle reste immobile.

Approchons un corps électrisé; elle est attirée très visiblement.

3. Il y a deux espèces d'électricité et deux seulement.

Expériences. — *a*) Frottons un bâton de *verre* avec du drap, approchons-le d'un pendule électrique à *fil isolant* (en soie[1]) : la balle est

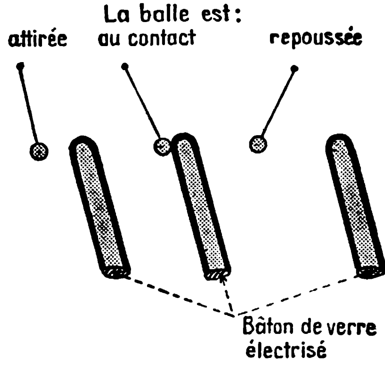


Fig. 5. — La balle est attirée par le verre électrisé; elle le touche; puis elle est vivement repoussée.

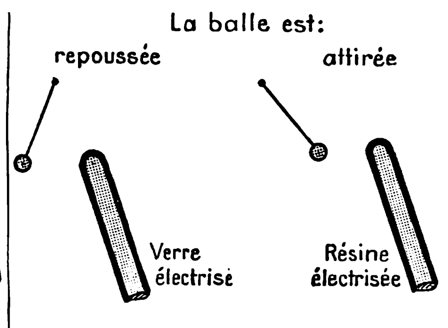


Fig. 6. — La même balle, *repoussée* par le verre électrisé, est *attirée* par la résine électrisée.
L'électricité de la résine est donc différente de l'électricité produite sur le verre.

1. Un fil de lin n'est pas un isolant suffisant pour qu'une balle de pendule conserve l'électricité qu'elle porte; la soie est un bien meilleur isolant.

attirée, elle touche le verre, s'électrise à son contact, puis elle est vivement repoussée (fig. 5).

Frottons un bâton de *résine* avec une peau de chat. Approchons-le de la balle qui est repoussée par le bâton de verre : elle est attirée (fig. 6).

Les électricités produites sur le verre et sur la résine sont donc différentes : nous les distinguerons en appelant celle du verre *électricité positive*, celle de la résine *électricité négative* (fig. 7).

b) Tout corps électrisé agit sur un pendule électrique préalablement électrisé, soit comme la résine, soit comme le verre électrisé : *il n'y a donc que deux espèces d'électricité.*

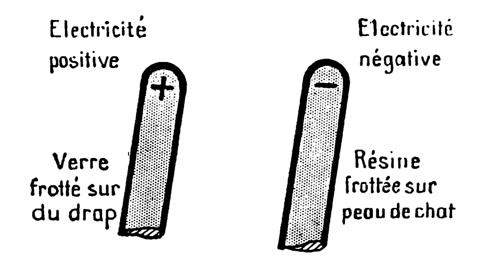


Fig. 7. — L'électricité développée sur le verre est dite *positive*; celle qui se développe sur la résine est dite *négative*.

4. Les électricités de même nom se repoussent, les électricités de noms contraires s'attirent.

Expériences. — *a*) La balle chargée d'électricité positive par contact avec le verre électrisé est repoussée par le verre électrisé (fig. 8), attirée par l'électricité négative de la résine.

b) Chargeons la balle de sureau d'électricité négative en la touchant d'abord avec un bâton de résine électrisé : elle est maintenant attirée par le verre électrisé et repoussée par la résine électrisée.

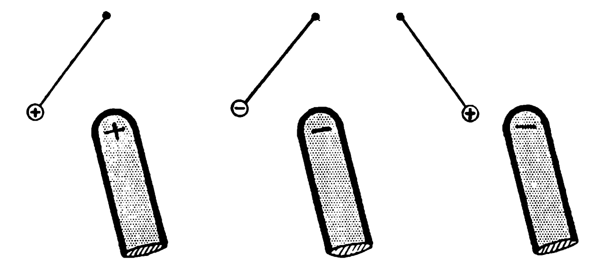


Fig. 8. — Les électricités de même nom se repoussent. Les électricités de noms contraires s'attirent.

5. Les deux électricités se développent simultanément par le frottement, en quantités égales.

Expériences. — Un disque de bois recouvert de drap et un disque de verre sont portés chacun par un manche isolant (fig. 9). Nous les frottons l'un contre l'autre, puis nous les présentons *l'un après l'autre à* un pendule électrique chargé d'électricité positive.

1° Le verre repousse la balle de sureau : il est électrisé *positivement.*

2° Le drap attire la balle de sureau : il est électrisé *négativement.*
3° Remettons les deux plateaux en contact : leur ensemble ne pro-

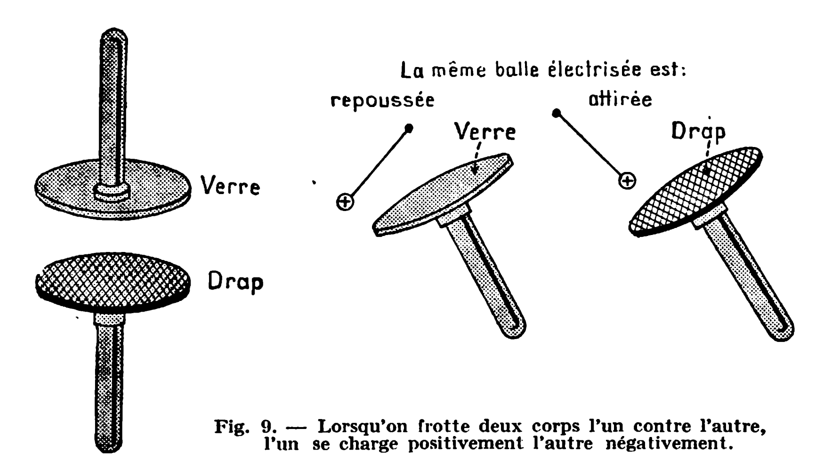


Fig. 9. — Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, l'un se charge positivement l'autre négativement.

duit plus d'action sur un pendule électrique non chargé : il est *neutre.* On explique ce résultat en disant que les quantités d'électricité positive et négative qui se sont développées simultanément sont égales.

6. L'électricité portée par un conducteur est localisée sur sa surface extérieure.

Expériences. — Un conducteur creux (fig. 11) est isolé : c'est, par exemple, une sphère creuse en laiton reposant sur un bloc de paraffine. Électrisons-le en le frappant légèrement avec une peau de chat bien sèche.

1° Touchons *sa surface extérieure* avec un petit disque de clinquant (*plan d'épreuve*, fig. 10) porté par une tige isolante. Approchons maintenant le disque d'un pendule électrique, nous constatons qu'*il est électrisé.*

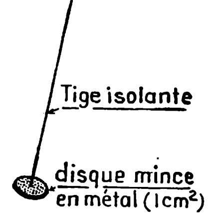


Fig. 10. — Plan d'épreuve.

2° Ramenons le plan d'épreuve à l'état neutre en le touchant avec la main ; puis mettons-le en contact avec un point quelconque de la *surface intérieure* du conducteur, en l'introduisant par un orifice ménagé à travers la paroi. Retirons-le, en ayant soin de ne pas toucher les bords de l'orifice. Nous constatons qu'il *n'est pas électrisé.*

En électricité statique, il est donc inutile d'employer des conducteurs massifs; des conducteurs creux suffisent.

7. Cage de Faraday.

Expérience. — Une cage métallique, formée d'un grillage, est reliée à la terre (fig. 12).

Un pendule électrique B est à l'extérieur de la cage, un autre pendule électrique C est à l'intérieur.

Approchons de l'ensemble un corps électrisé A. Il attire le pendule extérieur B, mais il est sans action sur le pendule intérieur C.

Des objets placés dans une cage métallique, même à larges mailles, échappent donc à l'action des phénomènes électriques qui se produisent à l'extérieur de la cage. Une telle cage joue le rôle d'un *écran électrique*; on l'appelle *cage de Faraday*.

Fig. 11. — Si l'on électrise un conducteur creux, toute l'électricité se porte à la surface extérieure du conducteur.

II. Influence électrostatique.

8. Un conducteur isolé placé dans le voisinage d'un corps électrisé s'électrise.

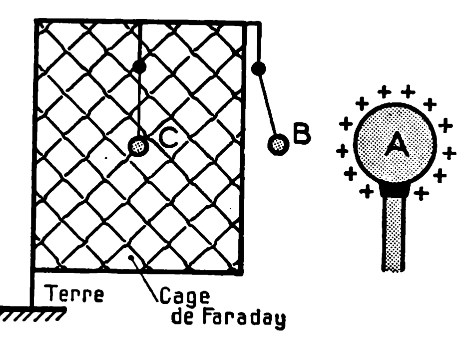


Fig. 12.

Expériences. — 1. Un cylindre conducteur A (fig 13) est suspendu par un fil isolant (soie). Sur la surface de ce cylindre sont attachés, à différentes hauteurs, de petits pendules à fil de lin et moelle de sureau, *a*, *b*, *c*, *d*.

2. Plaçons sous le cylindre une sphère B isolée et chargée d'électricité positive par exemple (fig. 14).

Les pendules s'écartent inégalement : fortement vers les extrémités du cylindre, moins vers le milieu, pas du tout dans une région *n* qui forme une zone neutre autour du conducteur A.

3. Approchons des pendules un bâton de résine électrisé négativement. Le pendule *a* est repoussé, les pendules *b*, *c*, *d*, attirés : l'électricité est donc distribuée sur le cylindre comme l'indique la figure (14).

On dit que la sphère B a électrisé le cylindre A par *influence* ou par *induction électrostatique*. Le conducteur B se nomme *inducteur*; le conducteur influencé A est l'*induit*.

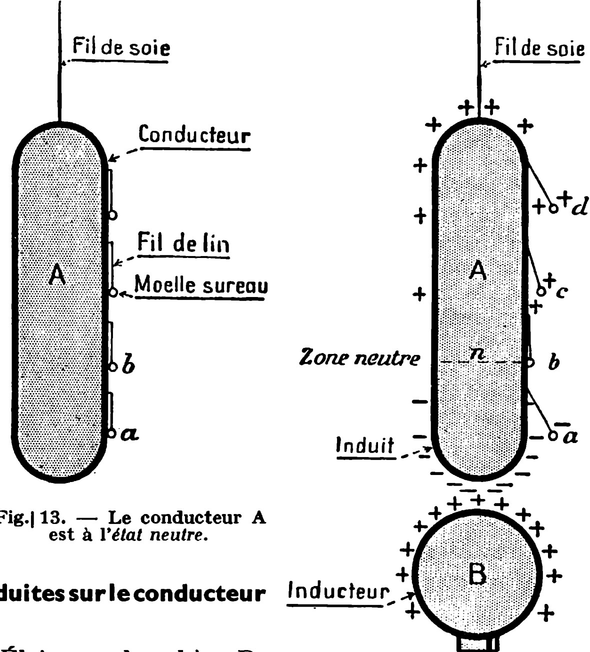


Fig. 13. — Le conducteur A est à l'*état neutre*.

Fig. 14. — La sphère B électrise par influence le cylindre A.

9. Les quantités d'électricité positive et négative produites sur le conducteur induit sont égales.

Expérience. — Éloignons la sphère B; le cylindre A revient à l'état neutre. Les charges positive et négative qu'il porte sont donc égales.

10. Par influence, on peut charger un conducteur d'une seule sorte d'électricité.

Expériences. — Recommençons l'expérience décrite dans le premier paragraphe. Touchons avec le doigt le conducteur induit A *en un point quelconque* (fig. 15); le pendule *a* continue à dévier, les pendules *c*, *d* retombent, l'électricité positive induite s'est écoulée dans le sol par le corps de l'expérimentateur.

Enlevons le doigt. Éloignons la sphère inductrice B. Tous les pendules divergent (fig. 16). Le cylindre est maintenant chargé d'électricité négative.

En recommençant les mêmes opérations, nous pouvons charger, avec la sphère B, autant de conducteurs tels que A que nous le voulons. La charge de B ne diminue pas. Les différents corps qu'elle a électrisés par influence possèdent, de ce fait, de l'énergie. D'où provient cette énergie?

Inducteur et induit chargés d'électricités de noms contraires s'attirent. Pour les éloigner l'un de l'autre, l'expérimenta-

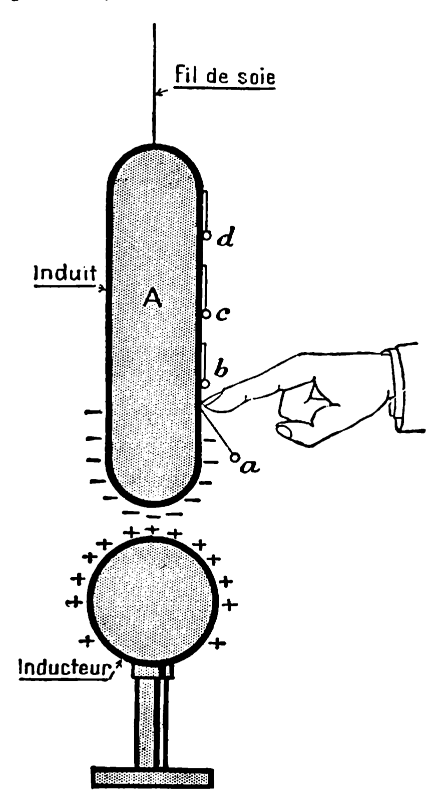


Fig. 15. — Le conducteur A est mis en communication avec la terre.
Il reste chargé seulement d'électricité négative dans la région voisine de l'inducteur.

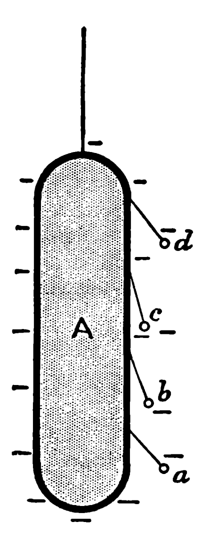


Fig. 16. — L'inducteur étant éloigné, l'électricité négative se répand sur toute la surface du conducteur induit.

teur effectue un travail contre ces forces électriques d'attraction. C'est ce travail mécanique, d'ailleurs faible et peu perceptible à la main qui le produit, qui est la source de l'énergie électrique que possède le corps induit.

II. Explication de l'attraction des corps légers par un corps électrisé.

Nous pouvons maintenant expliquer pourquoi un bâton de verre ou de résine électrisés attirent des fragments de papier ou des pendules électriques.

Les morceaux de papier ou la balle de sureau (fig. 17) sont d'abord à l'état neutre. L'approche d'un bâton de verre électrisé y induit de l'électricité négative et de l'électricité positive. La charge négative

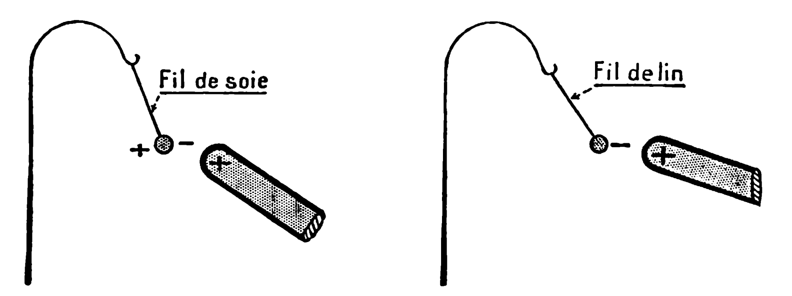


Fig. 17. — La balle de sureau est attirée parce qu'elle se charge d'électricité par influence.

Fig. 18. — Le pendule à fil de lin est attiré plus fortement que le pendule à fil de soie.

est plus près du bâton de verre que la charge positive, les forces d'attraction surpassent les forces de répulsion et les fragments de papier ou la balle de sureau sont attirés vers l'inducteur.

Si le fil du pendule est conducteur (fil de lin), la balle reste chargée d'électricité négative seulement : elle est plus fortement attirée (fig. 18).

III. Paratonnerres[1].

12. Les orages mettent en jeu des quantités énormes d'énergie.

Les nuages se forment par la condensation de la vapeur d'eau qui s'élève du sol. Un kilogramme de vapeur d'eau à la température de 15°C dégage 596 *kilocalories* en se condensant, soit près de 2,5 millions de *joules*. Or on estime qu'un nuage d'un volume d'un kilomètre cube renferme 3 ou 4 millions de kilogrammes d'eau, sa formation produit donc une quantité considérable d'énergie calorifique.

On ignore comment et dans quelle proportion cette chaleur se transforme en énergie électrique.

13. Une tension électrique existe entre les nuages et le sol.

Un nuage est constitué de minuscules gouttelettes d'eau, il forme un mauvais conducteur électrique. Des tensions électriques existent et se maintiennent entre ses différentes parties. Dans nos régions, la tension est le plus souvent *positive*

1. Renseignements donnés en complément du programme.

entre le haut et le bas des nuages, *négative* entre la partie inférieure du nuage et le sol (fig. 19).

On a pu évaluer l'ordre de grandeur de cette tension dans le cas de nuages orageux : on l'estime quelquefois à 1 000 millions de *volts*.

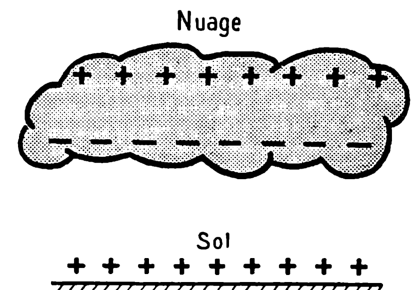


Fig. 19. — Dans 80 % des orages de nos régions, **la partie inférieure des nuages est négative par rapport au sol.**

14. Foudre, éclairs et tonnerre.

Quand la tension est assez élevée, des décharges électriques se produisent, soit entre deux nuages voisins, soit entre deux parties d'un nuage, soit entre un nuage et le sol. On donne le nom d'***éclairs*** à ces décharges et aux phénomènes qui les accompagnent, le ***tonnerre*** est le bruit des décharges. Le nom de ***foudre*** est plutôt réservé aux décharges qui atteignent le sol.

La quantité d'électricité mise en jeu dans la série de décharges constituant un coup de foudre est parfois évaluée à une trentaine de coulombs.

Si l'on applique au phénomène la formule de calcul de l'énergie de la décharge d'un condensateur (52e leçon), $W = \frac{1}{2} QV$, on trouve pour un coup de foudre :

$$W = \frac{1}{2} \times 30 \times 1\,000\,000\,000 = 1{,}5\ 10^{10} \textit{ joules},$$

soit environ 4 000 *kilowattheures*.

En supposant que les décharges d'un coup de foudre se succèdent pendant 1 seconde, la puissance moyenne atteint 15.10^9 *watts*, c'est-à-dire 15 millions de *kilowatts*.

On comprend que les effets destructeurs de la foudre puissent être considérables.

15. Quels sont les points du sol que frappe surtout la foudre?

Il n'est pas possible de donner une réponse ferme à cette question.

Des expériences de laboratoire, faites avec des tensions très élevées, ont montré :

1° que si le nuage orageux est *négatif* par rapport au sol, comme c'est le cas dans le plus grand nombre des orages dans nos régions tempérées, la foudre tombe surtout sur les points du sol les plus élevés : tours, clochers, arbres, etc.;

2° que si le nuage est positif par rapport au sol, cette préférence ne se marque pas.

Cette constatation explique que le modèle ancien de paratonnerre inventé par Franklin n'est pas toujours efficace.

16. Paratonnerre de Franklin.

Il consiste en une tige métallique pointue dressée sur le bâtiment à préserver et mise en communication avec le sol par un bon conducteur.

On attribue à un tel paratonnerre un effet protecteur et un effet préventif.

1° *Effet protecteur* — La foudre frappera cette tige, qui domine tout autre point du bâtiment, et la décharge s'écoulera à la terre par le conducteur sans produire de dégâts. Nous avons indiqué dans le paragraphe précédent que cet effet n'est certain que si le nuage orageux est négatif.

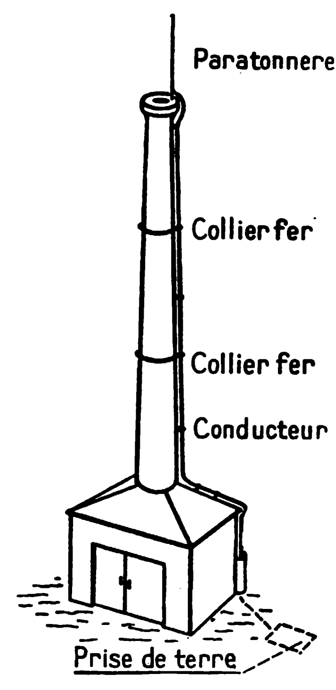


Fig. 20. — Protection d'une haute cheminée d'usine par un paratonnerre à pointe.

2° *Effet préventif.* — Par une pointe portée à haute tension, s'échappe dans l'atmosphère un courant électrique qui diminue la tension. Bien des savants estiment que cet effet de pointe est trop peu important pour produire un résultat utile.

Actuellement, on réserve ces paratonnerres pour les édifices isolés, très hauts et de peu de surface, surtout pour les hautes cheminées d'usines.

17. Installation d'un paratonnerre à pointe.

Le *paratonnerre* est un tube de fer galvanisé avec une pointe de cuivre parfois dorée.

Le *conducteur*, en cuivre méplat de 35 à 50 *millimètres carrés* de section, descend sans boucles, sans coudes brusques, le long du bâtiment. A quelque distance du sol, il est protégé par un tube de fer d'environ 3 *mètres* de long qui pénètre dans le sol. A l'entrée du tube, une petite barrette permet de séparer le conducteur de la prise de terre pour vérifier la résistance de cette prise qui doit être inférieure à 20 *ohms* (fig. 20).

S'il y a des parties métalliques dans la construction, on les connecte au conducteur de descente.

La *prise de terre* est constituée par une plaque ou un grillage de cuivre, ou une feuille de zinc; elle est enterrée dans un sol humide à 3 ou 4 *mètres* du bâtiment.

L'aluminium ne convient pas dans une installation de paratonnerre à cause de son peu de résistance aux actions chimiques et de sa facilité de fusion. A défaut de cuivre des conducteurs en fer galvanisé seraient préférables à des conducteurs en aluminium.

18. Paratonnerre de Melsens.

Ce paratonnerre utilise les propriétés de la cage de Faraday.

Pour protéger un bâtiment de la foudre, on peut l'entourer, particulièrement à sa partie supérieure, d'un réseau de conducteurs métalliques en bonne communication électrique avec le sol.

Ce type de paratonnerre, nommé *paratonnerre de Melsens*, est plus efficace que le paratonnerre à tige de Franklin.

19. Installation d'un paratonnerre de Melsens.

On emploie les mêmes matériaux que pour un paratonnerre à tige.

Des conducteurs méplats en cuivre, constituant la cage, suivent, à faible distance, les arêtes du bâtiment (fig. 21). Les changements de direction sont effectués par des coudes à grand rayon. Les pièces métalliques importantes de la construction, charpentes en fer, conduites d'eau, sont reliées par de gros conducteurs au réseau extérieur au bâtiment.

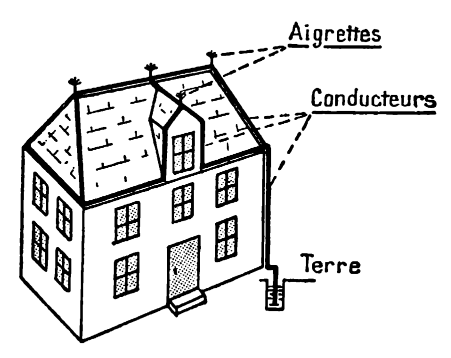


Fig. 21. — **Paratonnerre Melsens.** De gros conducteurs suivant les arêtes du bâtiment en formant une sorte de cage mise à la terre en plusieurs points et surmontée d'aigrettes métalliques.

On met habituellement des pointes ou des aigrettes sur les points les plus élevés de l'édifice, sans que ce soit indispensable.

Plusieurs descentes au sol sont recommandées, chacune aboutissant à une prise de terre.

Des paratonnerres s'imposent sur tous les bâtiments renfermant des matières explosives ou très combustibles et encore sur les édifices importants dans les régions où les orages sont fréquents.

Condensateurs.

1. Construisons un condensateur.

Collons *deux feuilles d'étain* sur deux feuilles de verre épaisses de 2 millimètres. Plaçons ces vitres sur un support isolant, bloc de paraffine ou cristallisoir bien sec en verre, en mettant les feuilles d'étain en face l'une de l'autre. Maintenons les vitres à un écartement de 2 millimètres par quatre cales de verre mises dans les coins.

Nous obtenons ainsi deux *surfaces planes conductrices isolées, parallèles, séparées par une lame d'air* (fig. 1 et 2).

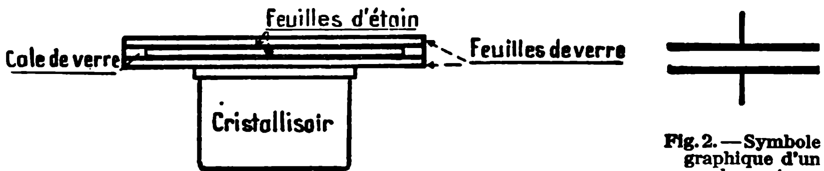


Fig. 1. — Un ***condensateur à lame d'air*** comporte essentiellement deux surfaces conductrices séparées par une couche d'air.

Fig. 2. — Symbole graphique d'un condensateur (ou d'une capacité).

Cet ensemble se nomme un *condensateur*; les plaques conductrices sont les *armatures*.

2. Expériences.

Relions les armatures A et B à un commutateur bipolaire D à deux directions qui permet de les brancher, soit aux bornes + et — d'une distribution de courant continu à 110 volts, soit aux bornes d'un *galvanomètre balistique* G (fig. 3).

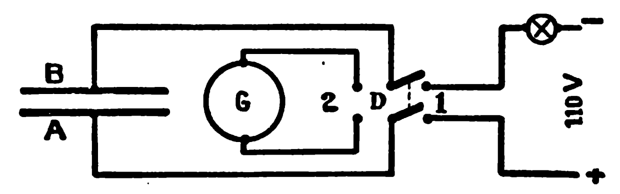


Fig. 3. — Montage pour charger et décharger le condensateur AB. Il se charge lorsque le commutateur D est en 1. Il se décharge dans le galvanomètre balistique G lorsque D est en 2.

a) Plaçons le commutateur en 1, les armatures A et B sont alors connectées aux bornes de la distribution.

Faisons passer rapidement le commutateur de la position 1 à la position 2 pour brancher le condensateur sur le galvanomètre : l'aiguille du galvanomètre est lancée, par exemple, jusqu'à la division 30, puis revient au zéro.

Le galvanomètre a donc été traversé par une quantité d'électricité mesurée par l'élongation de l'aiguille : soit Q coulombs. Cette quantité d'électricité provient évidemment du condensateur.

b) On explique ainsi le fonctionnement de l'appareil.

1° Quand les armatures sont reliées aux bornes de la ligne de distribution, Q coulombs sont transportés par la f. é. m. du générateur de l'armature B à l'armature A. Sur A se trouve ainsi une quantité d'électricité positive + Q coulombs et sur B une quantité d'électricité négative — Q coulombs.

On dit que le condensateur est *chargé* et que sa charge est Q coulombs.

2° Quand les armatures sont réunies ensuite par les fils conducteurs et le galvanomètre, la quantité d'électricité positive + Q passe, par le circuit conducteur, de l'armature A à l'armature B où elle neutralise la charge d'électricité négative existante — Q : les deux armatures reviennent à l'état neutre, le condensateur est déchargé.

3. La charge Q coulombs d'un condensateur est proportionnelle à la tension U volts entre ses armatures.

Recommençons l'expérience précédente en utilisant une tension de 220 volts. Le galvanomètre dévie de 60 divisions. La charge du condensateur est double de ce qu'elle était pour 110 volts. De même, à une tension triple correspond une charge triple.

Donc, *la charge Q coulombs d'un condensateur est proportionnelle à la tension U volts entre ses armatures* et l'on peut écrire :

$$Q = CU \qquad (1)$$

C étant une quantité constante.

4. Chaque condensateur est caractérisé par sa capacité électrique.

Le facteur C de la formule précédente est constant pour un condensateur donné; mais il varie d'un condensateur à l'autre.

Il mesure la propriété de l'appareil de recevoir une charge électrique plus ou moins grande pour une tension donnée : on l'appelle *capacité du condensateur.*

5. L'unité de capacité électrique est appelée farad (symbole F).

La définition de cette unité résulte de la formule (1) : *c'est la capacité d'un condensateur dont la charge est de* 1 *coulomb lorsque la tension entre ses armatures est de* 1 *volt.*

On lui a donné le nom de *farad* en l'honneur de Faraday. C'est une capacité énorme. L'unité usuelle est le *microfarad* (μF,) qui vaut un millionième de farad. Toutefois, dans toutes les formules et les calculs numériques, les capacités doivent être évaluées en farads.

Comme $C = \frac{Q}{U}$ nous symbolisons la définition du farad en écrivant :

$$1\ farad = \frac{1\ coulomb}{1\ volt}$$

6. De quels facteurs dépend la capacité d'un condensateur?

Faisons varier successivement les *dimensions* et la *nature* des éléments d'un condensateur.

1° ***Influence de la surface des armatures.***

Remplaçons le condensateur que nous avons employé dans les expériences précédentes par un autre dont les feuilles d'étain ont une surface moitié moindre, la distance de ces feuilles restant la même.

Chargeons le condensateur comme précédemment sous 110 volts.

Puis, déchargeons-le : l'élongation du galvanomètre balistique est maintenant de 15 divisions au lieu de 30 précédemment.

La capacité d'un condensateur est donc proportionnelle à la surface des armatures.

2° ***Influence de la distance des armatures.***

Reprenons le premier condensateur. Doublons l'épaisseur des cales de verre qui déterminent la distance des feuilles d'étain.

La charge sous 110 volts est la moitié de ce qu'elle était auparavant, les autres conditions n'ayant pas changé.

La capacité d'un condensateur est donc inversement proportionnelle à la distance des armatures.

3° ***Influence de la nature des armatures.***

Les armatures d'un condensateur de mêmes dimensions que celui du premier paragraphe de la leçon sont constituées par des feuilles de papier argenté collées sur les feuilles de verre.

Nous chargeons ce condensateur sous 110 volts, puis nous le déchargeons dans le galvanomètre balistique : l'élongation produite est de 30 divisions.

La nature et la résistivité du métal des armatures d'un condensateur sont sans influence sur la capacité de l'appareil.

4° ***Influence de la nature de l'isolant qui sépare les armatures.***

Enlevons les cales de verre qui écartent les armatures de notre condensateur et retournons la vitre supérieure avant de la poser sur l'autre. Le condensateur est maintenant formé de deux armatures qui sont distantes encore l'une de l'autre de 2 millimètres, mais séparées par du verre au lieu d'air.

L'élongation de l'aiguille du galvanomètre à la décharge du condensateur chargé sous 110 volts est 90 divisions. La quantité d'électricité est trois fois plus grande.

L'isolant qui sépare les deux armatures intervient donc dans le fonctionnement du condensateur autrement que par ses propriétés isolantes : on le nomme *diélectrique.* Si un condensateur à lame d'air a une capacité C farads, quand on remplace l'air par un *autre diélectrique ayant la même épaisseur*, la capacité devient C' farads telle que :

$$C' = C \times K.$$

On donne au nombre *K* le nom de *pouvoir inducteur spécifique* ou de *constante diélectrique* du diélectrique.

Voici quelques valeurs de ce facteur :

DIÉLECTRIQUE	CONSTANTE DIÉLECTRIQUE	DIÉLECTRIQUE	CONSTANTE DIÉLECTRIQUE
Air.	1	Verre	3 à 5
Papier paraffiné	1,9	Mica	8
Paraffine . . .	2,3	Bakélite. . . .	7

7. Formule donnant la capacité d'un condensateur.

De ce qui précède, il résulte que la capacité d'un condensateur a pour expression :

$$C = A\frac{S}{e}K. \qquad (2)$$

Dans cette formule :

S, surface de l'une des armatures en regard de l'autre armature, est évaluée en *mètres carrés;*

e, distance des armatures en *mètres;*

K est la constante diélectrique;

A, un coefficient numérique qui est, pour que C soit exprimée en *farads* :

$$A = 0{,}88.10^{-11}.$$

Indiquons les unités :

$$\boxed{\underset{farads}{C} = 0{,}88.10^{-11}K\frac{S_{m^2}}{e_m}.}$$

Cette formule est valable quelle que soit *la forme* du condensateur, si les deux surfaces métalliques en regard ont sensiblement la même grandeur.

Application numérique. — *Calculons la capacité du condensateur employé au cours de la leçon.*

Les feuilles d'étain ont 40 *cm* de longueur, 30 *cm* de largeur; elles sont distantes de 0,2 *cm* et l'isolant est de l'air (K = 1). Donc :

$$C = 0{,}88 \times 10^{-11} \times 1 \times \frac{0{,}4 \times 0{,}3}{0{,}002} = 5{,}3 \times 10^{-10}F = 0{,}53\ m\mu F.$$

Cette capacité devient :

$$0{,}53 \times 3 = 1{,}6\ m\,\mu\mathrm{F}$$

quand le diélectrique est du verre.

8. Par couplage de condensateurs, on obtient de grandes ou de petites capacités.

Quand on dispose de plusieurs condensateurs, on peut les monter :

1° en ***dérivation*** ou en ***parallèle*** comme l'indique la figure 4. *La*

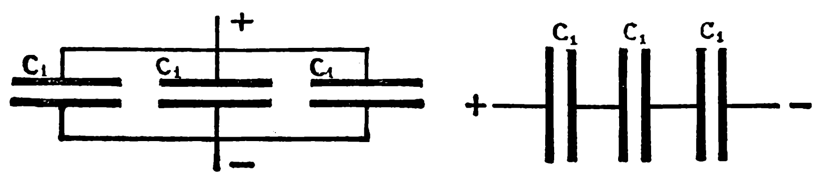


Fig. 4. — ***Condensateurs couplés en dérivation.*** La capacité C de cette batterie de 3 condensateurs identiques (capacité de chacun C_1), est $C = 3\ C_1$.

Fig. 5. — ***Condensateurs couplés en série.*** La capacité C de cette batterie de 3 condensateurs identiques (capacité de chacun C_1), est $C = C_1 : 3$.

capacité de la batterie est la somme des capacités de tous les condensateurs :

$$C = \Sigma C_1. \qquad (3)$$

Exemple. — En couplant en dérivation 3 condensateurs de 0,1 μF, on obtient une batterie de capacité égale à 0,3 μF.

La capacité de la batterie augmente quand s'accroît le nombre des condensateurs en dérivation.

2° en ***série*** ou en ***cascade;*** c'est le couplage de la figure 5. L'inverse de la capacité de la batterie est égal à la somme des inverses des capacités des condensateurs couplés :

$$\frac{1}{C} = \Sigma \frac{1}{C_1} \qquad (4)$$

Exemple. — En couplant en série 4 condensateurs de 0,1 μF, on obtient une batterie de capacité C telle que :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{0{,}1} + \frac{1}{0{,}1} + \frac{1}{0{,}1} + \frac{1}{0{,}1} = \frac{4}{0{,}1}$$

d'où

$$C = \frac{0{,}1}{4} = \boldsymbol{0{,}025\ \mu F.}$$

La capacité diminue quand s'accroît le nombre des condensateurs montés en série.

Nous démontrerons les formules (3) et (4) dans une note complémentaire page 325.

9. Un condensateur que l'on charge emmagasine de l'énergie.

L'énergie *W* emmagasinée par un condensateur ou une batterie de condensateurs de capacité C farads quand la tension U volts entre ses armatures est proportionnelle :

1° à la charge Q;
2° à la tension U entre les armatures.

On démontre[1] qu'elle est égale à $\frac{1}{2}$ QU :

$$\underset{\text{joules}}{W} = \frac{1}{2} \underset{\text{coulombs}}{Q} \underset{\text{volts}}{U} \qquad (5)$$

Puisque Q = CV, on a aussi :

$$\underset{\text{joules}}{W} = \frac{1}{2} \underset{\text{farads}}{C} \underset{\text{volts}}{U^2} \qquad (6)$$

10. Entre les armatures d'un condensateur existe un champ électrique.

Soit un condensateur à diélectrique d'air formé de deux armatures à quelques centimètres l'une de l'autre (fig. 6).

Entre les armatures A et B, on a établi une tension U volts. Sur A se trouve une quantité + Q coulombs, sur B, — Q coulombs.

Une certaine quantité d'électricité positive placée entre les armatures, par exemple la balle électrisée M d'un pendule électrique, est repoussée par l'armature A attirée par l'armature B.

On exprime ce fait en disant qu'*entre les armatures A et B existe un champ électrique*.

Si le support de la charge M est supposé libre de se déplacer et sans poids, la charge positive que l'on place d'abord très près de l'armature A se dirige vers l'armature B : *le chemin qu'elle suit est une ligne de force ab du champ*.

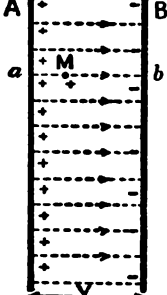


Fig. 6. — Entre les armatures A et B du condensateur existe un champ électrique dont *ab* est une ligne de force.

Quand les armatures sont des plans parallèles, les lignes de force du champ électrique sont des droites normales aux armatures.

Sur l'une de ces lignes de force *ab*, la tension entre le point *b* et un point qui se déplace de *b* vers *a* croît de O à U.

Quand le diélectrique est solide (paraffine, verre, papier ou mica), dans toute son épaisseur existe aussi un champ électrique.

1. Voir la note complémentaire, page 325.

Remarque. — Un conducteur chargé, éloigné de toute autre charge électrique, peut être considéré comme une armature d'un condensateur dont l'autre armature est constituée par les autres conducteurs situés dans le voisinage et surtout dans le sol.

Ce conducteur a donc une capacité C = Q : U, si Q est sa charge et U sa tension par rapport au sol; et, autour de lui, existe un champ électrique.

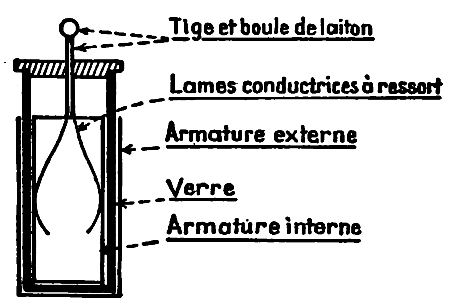


Fig. 7. — Condensateur fait d'un bocal de verre (Bouteille de Leyde).

II. Condensateurs usuels.

a) Avec les machines électrostatiques, on utilise des condensateurs constitués par des bocaux de verre; les armatures sont des feuilles d'étain collées à l'intérieur et à l'extérieur des flacons (fig. 7). De tels condensateurs sont employés comme collecteurs dans les machines de Wimshurst. La surface des armatures n'est pas grande et la capacité de tels condensateurs est faible; pourtant, à cause de la tension élevée qui existe entre les armatures, ils emmagasinent des quantités assez importantes d'électricité et ils fournissent à la décharge des étincelles bien nourries.

b) Les *condensateurs fixes* des appareils de TSF sont fabriqués en empilant les unes sur les autres des lames d'étain et de mica (fig. 8). On réunit entre elles les feuilles d'étain de rang impair, entre elles les feuilles d'étain de rang pair.

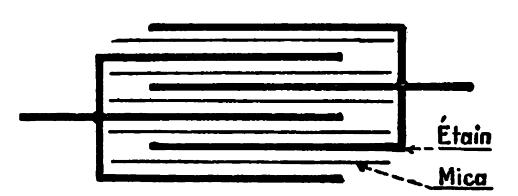


Fig. 8. — Condensateur fixe au mica.

c) Des condensateurs pour appareils téléphoniques sont construits en superposant deux longues bandes d'étain et deux longues bandes de papier; le tout est ensuite enroulé et comprimé (fig. 9). Les bandes de papier sont faites de plusieurs feuilles très minces (0,01 *mm*) superposées et imprégnées de paraffine, de cire ou de vernis à la bakélite. Un tel condensateur n'a parfois qu'un volume de 50 centimètres cubes pour une capacité de 1 à 2 microfarads.

d) Moins volumineux encore sont les *condensateurs électrolytiques* dont voici le principe. Si l'on cherche à électrolyser une solution de chlorure d'ammonium (fig. 10) avec deux électrodes, dont l'une est en aluminium et l'autre en fer, en plomb ou en charbon, le courant ne s'établit que si

l'aluminium est cathode. Quand l'aluminium est anode, il se recouvre rapidement d'une couche très mince d'alumine isolante. Le voltamètre est devenu un condensateur dont les armatures sont l'électrolyte et l'aluminium et le diélectrique la couche d'alumine isolante. Parce que ce diélectrique est de très faible épaisseur, la capacité est grande.

On fabrique des condensateurs demi-secs en enroulant deux bandes d'aluminium séparées par du papier imprégné d'électrolyte. A capacité égale, un condensateur électrolytique est huit ou dix fois moins volumineux qu'un condensateur au papier.

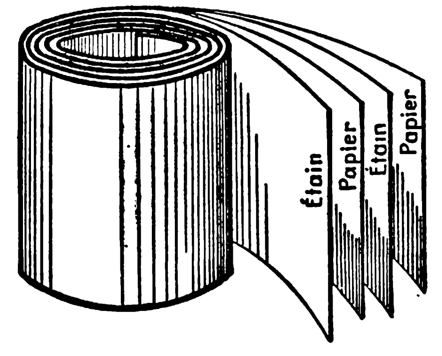


Fig. 9. — Condensateur à feuilles d'étain et diélectrique en papier.

e) Dans les installations industrielles à courants alternatifs, on monte quelquefois des condensateurs en parallèle avec des appareils récepteurs pour *améliorer le fonctionnement de l'installation.*

Le diélectrique de ces condensateurs est du papier, les armatures des feuilles d'aluminium.

Ces condensateurs sont en service plusieurs heures par jour. Ils s'échauffent. C'est que, dans le diélectrique, existe un champ électrique important, qui s'inverse à chaque alternance de la tension avec un retard analogue à celui de l'aimantation du fer par rapport au courant aimantant. L'*hystérésis diélectrique* provoque une perte d'énergie, dissipée en chaleur.

Pour faciliter le refroidissement du condensateur, on le plonge dans une cuve pleine d'huile. L'huile pénètre d'ailleurs dans le diélectrique et améliore l'isolement (64e Leçon, fig. 2).

Le courant passe — Ls courant ne passe pas

+ Fe Al − + Al Fe −

Solution de ClNH4

Couche d'Alumine

Fig. 10. — Formation d'un condensateur électrolytique en courant continu.

f) Dans les appareils de TSF, on emploie des condensateurs à air à capacité variable. Ils sont formés de deux séries de lames métalliques en forme de demi-cercle ou de quart de cercle. Les lames d'une série sont fixes. Celles de l'autre série tournent dans leur

plan autour d'un axe qui leur est perpendiculaire et pénètrent plus ou moins entre les lames fixes sans les toucher. Lames fixes d'une part, lames mobiles d'autre part sont les armatures du condensateur.

En tournant le bouton moleté, on modifie à volonté la surface des armatures en regard et par suite la capacité du condensateur. Cette capacité est d'ailleurs faible, elle est de l'ordre du millième de microfarad (fig. 11 et 12).

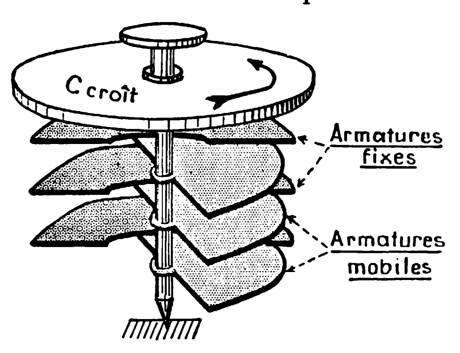


Fig. 11. — *Condensateur variable.* **Pourquoi la capacité va-t-elle croissant quand on tourne le bouton dans le sens de la flèche?**

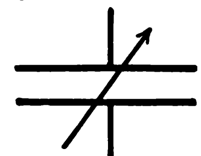


Fig. 12. — Symbole graphique d'un condensateur variable ou réglable.

12. La rigidité diélectrique limite la tension entre les armatures.

Si l'on fait croître la tension entre les armatures d'un condensateur. pour une valeur suffisamment élevée, une étincelle jaillit entre les armatures *à travers le diélectrique.* Quand le diélectrique est autre que l'air, l'appareil est hors service : un contact électrique s'est établi entre les armatures, le condensateur est « claqué ».

La tension qui suffit à provoquer une étincelle à travers une épaisseur de 1 centimètre d'un isolant caractérise la *rigidité diélectrique* de l'isolant. Voici, à titre d'indication, quelques valeurs exprimées en kilovolts par centimètre.

DIÉLECTRIQUE (ou isolant)	AIR	VERRE	PAPIER PARAFFINÉ	MICA
Rigidité diélectrique en kilovolts par centimètre	30	75 à 300	400 à 500	600 à 700

La tension de service à ne pas dépasser dans leur emploi est inscrite sur les condensateurs industriels.

Exercices.

1. **Calculer la surface des armatures d'un condensateur dont la capacité serait 1 farad. Le diélectrique serait du papier paraffiné d'épaisseur 0,1 *mm* dont la constante diélectrique est 1,9. On exprimera le résultat en kilomètres carrés.**

2. **Un condensateur joue le rôle de *récepteur* électrique pendant la *charge*, de *générateur* pendant la décharge.**

Expliquez pourquoi. — A quel autre appareil électrique est-il comparable?

3. — Quelle doit être la surface des armatures d'un condensateur de 1 microfarad à diélectrique de mica de 0,1 mm d'épaisseur. La constante diélectrique du mica est 8.

4. Même question pour un condensateur électrolytique. Diélectrique alumine, épaisseur 0,001 mm, K = 9.

5. Un condensateur de capacité 1µF est réuni 200 fois par seconde, par un commutateur tournant, à un générateur de f. é. m. 100 V et de résistance négligeable. Le commutateur permet également, à la même fréquence, la décharge du condensateur sur une résistance de 10 Ω. Calculer la puissance moyenne fournie à cette résistance et l'intensité du courant continu qui produirait le même dégagement de chaleur.

6. Trois condensateurs dont les capacités sont 10µF, 15µF et 30 µF sont couplés en série. Le groupement est réuni à un générateur donnant entre ses bornes une tension de 200 *volts*. Calculer les tensions aux bornes des condensateurs et les énergies emmagasinées par chacun d'eux.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

1° Couplage de condensateurs.

a — *en parallèle*

La tension U aux bornes des condensateurs est la même; le condensateur C_1 prend une charge $Q_1 = C_1U$, C_2 prend une charge $Q_2 = C_2U$ ..., C_n prend une charge $Q_n = C_nU$.

Le condensateur de capacité C équivalente au groupement doit prendre une charge $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = CU$. On a donc :

$$CU = C_1U + C_2U + \dots + C_nU$$
$$= (C_1 + C_2 + \dots + C_n)\,U$$

et

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \Sigma C_1.$$

b — *en série* — Soit trois condensateurs de capacités C_1, C_2, C_3 montés en série. L'ensemble est soumis à la tension U.

Si nous désignons par U_1, U_2, U_3 les tensions aux bornes de C_1, C_2, C_3, nous avons :

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Or la charge Q de chacun des condensateurs est la même; en effet l'armature positive d'un condensateur et l'armature négative du condensateur voisin forme un système isolé dont la charge totale est nulle.

Nous pouvons calculer $U_1 = Q : C_1$, $U_2 = Q : C_2$, $U_3 = Q : C_3$. On a alors :

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \quad \text{et} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \Sigma \frac{1}{C_1}.$$

2° Energie emmagasinée dans le champ électrique.

La charge q d'un condensateur est proportionnelle à la tension u entre ses armatures : $q = Cu$.

Pendant la charge du condensateur u varie de O à U et q varie de O à Q; la courbe représentant u en fonction de q est la droite OA (fig. 13).

Le condensateur emmagasine de l'énergie. Si la quantité d'électricité Q était

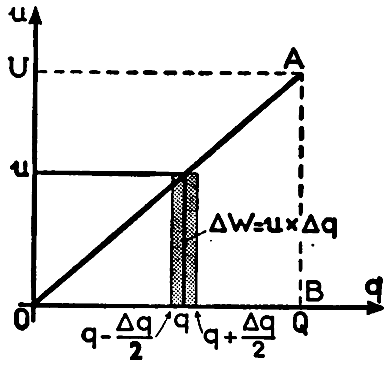


Fig. 13.

fournie au condensateur sous la *tension constante* U, l'énergie emmagasinée serait

$$W = U \times Q.$$

Mais la *tension* est *variable*; chaque quantité élémentaire d'électricité Δq reçoit une énergie différente. Raisonnons avec une quantité d'électricité assez faible pour que la variation de la tension puisse être négligée. Par exemple, sous la tension constante u la charge augmente de Δq, en passant de $q - \frac{\Delta q}{2}$ à $q + \frac{\Delta q}{2}$.

Cette quantité d'électricité Δq reçoit une énergie $\Delta W = u \times \Delta q$; cette énergie est proportionnelle à la surface du rectangle grisé sur la figure 13. Lorsque nous envisageons la charge complète du condensateur l'énergie emmagasinée $W = \Sigma . \Delta W$ est proportionnelle à la surface du triangle OAB, somme des surfaces rectangulaires élémentaires lorsque u varie de O à U.

On a donc :

$$W = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2.$$

14. COURANT ALTERNATIF.

53e LEÇON

Comparaison des propriétés du courant continu et du courant alternatif.

I. Voici des expériences qui permettent de comparer les effets du courant continu à ceux du courant alternatif.

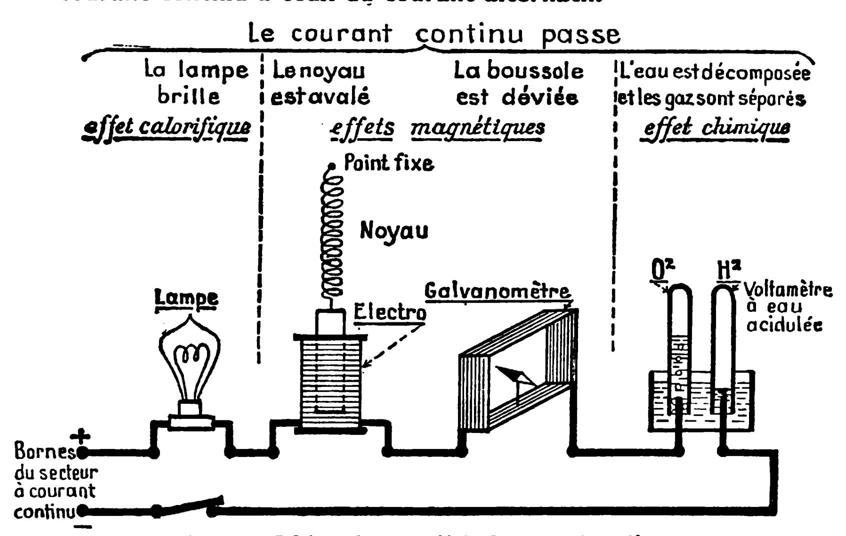


Fig. 1. — Schéma des propriétés du courant continu.

Montons en série (fig. 1) :
une *lampe* à incandescence,
un *électro-aimant* à noyau plongeur,
un *galvanomètre* fait d'un cadre de quelques spires et d'une boussole,
un *voltamètre* à eau acidulée.

1° Relions cette série d'appareils par deux fils conducteurs aux deux bornes d'une distribution à ***courant continu.*** Nous constatons que
la lampe s'allume;
l'électro attire son noyau;
l'aiguille aimantée dévie de sa position de repos et se place presque perpendiculairement au cadre galvanométrique;
de l'hydrogène se dégage sur l'une des électrodes du voltamètre, de l'oxygène sur l'autre électrode.

Intervertissons les connexions aux bornes;
la lampe s'allume comme précédemment;
le noyau plongeur est avalé comme précédemment;
mais la déviation de l'aiguille change de sens;
mais l'hydrogène se dégage sur l'électrode où se dégageait l'oxygène et inversement.

La déviation de l'aiguille aimantée, la nature des gaz recueillis sur les électrodes du voltamètre, montrent que le courant continu est un *phénomène polarisé,* c'est-à-dire que les deux bornes de prise du courant ont des propriétés différentes. C'est pourquoi, *par convention,* l'une de ces bornes est nommée *borne positive,* l'autre *borne négative. Par convention* aussi, un sens est attribué au courant; il va de la borne positive à la borne négative dans le circuit extérieur.

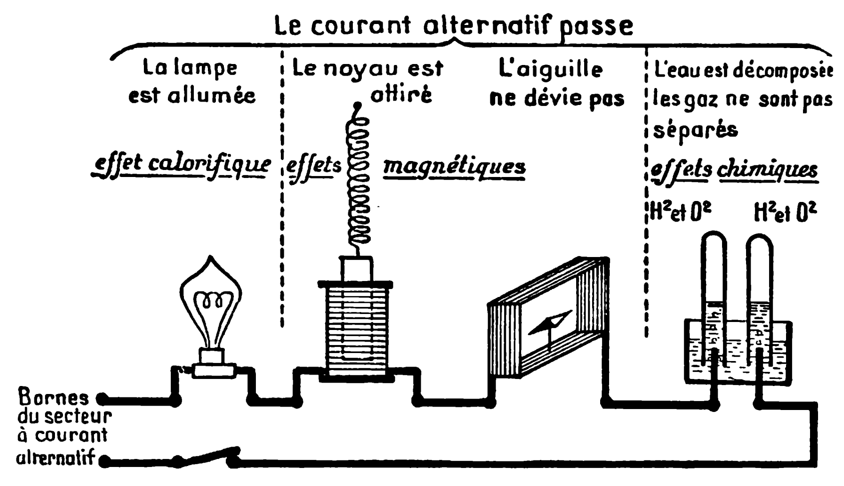


Fig. 2. — Schéma des propriétés du courant alternatif.

2° Recommençons l'expérience en branchant la série d'appareils aux deux bornes d'une distribution à ***courant alternatif*** (fig. 2).

Nous constatons que :
la lampe s'allume,
l'électro attire son noyau,
l'aiguille aimantée vibre, mais *sans dévier* de sa position d'équilibre,
aux deux électrodes du voltamètre, il se dégage des *volumes égaux* d'un gaz que nous reconnaissons, en l'enflammant, être un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Donc, *comme le courant continu, le courant alternatif possède des propriétés calorifiques, magnétiques* et *chimiques*. Mais nous ne constatons aucune différence entre les deux bornes d'amenée du courant : le *courant alternatif n'est pas un phénomène polarisé.*

2. Les expériences avec du papier cherche-pôles prouvent que le courant alternatif change périodiquement de sens.

Imbibons une feuille de papier à filtrer avec une solution de ferrocyanure de potassium et de chlorure de sodium[1]. Après l'avoir essorée, plaçons la feuille humide sur une plaque de zinc (fig. 3). Faisons glisser

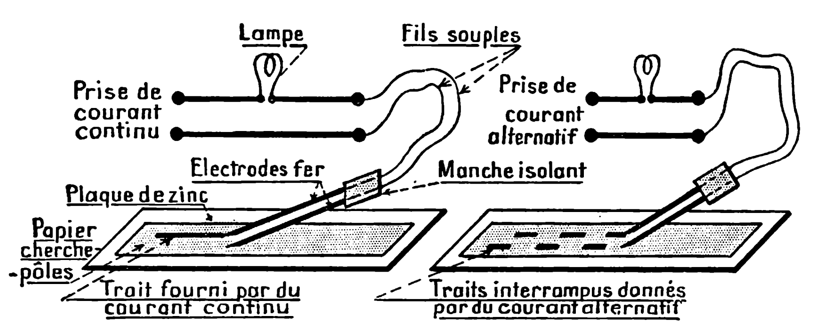


Fig. 3. — Expérience avec du *courant continu à gauche*, du *courant alternatif à droite*.

rapidement sur le papier deux pointes émoussées en *fer*, fixées sur un même support isolant et connectées — avec une lampe en série pour éviter un court-circuit — aux bornes de la distribution de courant.

1° Quand les deux bornes sont celles de la distribution de ***courant continu***, nous constatons que l'une des tiges de fer trace sur le papier *un trait continu bleu*; la ligne suivie par l'autre tige n'est pas colorée.

L'expérience s'explique ainsi : le courant électrolyse le chlorure de sodium; le chlore qui se forme à la pointe anode donne avec le fer du

1. Mélanger à volumes égaux des solutions saturées de ferrocyanure de potassium et de chlorure de sodium, puis étendre le mélange de son volume d'eau. Au lieu de chlorure de sodium, on peut employer du nitrate d'ammonium.

chlorure ferrique; et le ferrocyanure de potassium produit avec le sel ferrique du *bleu de Prusse* : la trace de l'anode est un trait bleu.

2° Quand les deux bornes auxquelles sont reliées les pointes de fer sont celles de la distribution de ***courant alternatif,*** nous obtenons sur le papier humide deux lignes de tirets bleus. Les traits sont séparés par des parties non colorées. Ils alternent d'une ligne à l'autre : à un trait d'une ligne correspond un intervalle de l'autre.

Donc, chaque électrode est alternativement positive et négative.

Le courant alternatif est un courant qui change de sens périodiquement.

Les bornes qui amènent le courant sont alternativement positives et négatives : la tension qui existe entre elles est une *tension alternative.*

3. La fréquence et la période d'un courant alternatif sont des caractéristiques importantes de ce courant.

1° Si, dans l'expérience précédente, on déplace les pointes de fer sur le papier humide pendant une seconde et que l'on compte les interruptions du trait bleu tracé par chaque électrode, on en trouve 50. Chaque électrode a été 50 fois positive et 50 fois négative pendant une seconde. Le courant a passé 50 fois dans un sens pendant une seconde et 50 fois en sens contraire.

On dit que sa *fréquence est* 50 périodes par seconde, ou encore de 50 *hertz.*

La fréquence d'un courant alternatif est le nombre de fois que le courant reprend le même sens pendant une seconde.

L'unité de fréquence est le *hertz* (symbole Hz). La fréquence du courant employé dans les expériences précédentes est $f = 50$ *hertz.* On écrit aussi $f = 50 \sim$.

Nous n'étudierons que les courants alternatifs, dont la fréquence est constante.

2° Les traits bleus sont de même longueur si l'on déplace les pointes de fer d'un mouvement uniforme. Le même temps s'écoule donc entre deux reprises consécutives du même sens.

Le *temps constant qui s'écoule entre deux reprises consécutives du même sens par un courant alternatif se nomme la **période** du courant.*

La période du courant que nous avons employé est

$$1 : 50 = 0{,}02 \text{ seconde;}$$

d'une façon générale, entre la période T d'un courant et sa fréquence f existe la relation

$$\underset{\textit{secondes}}{T} = \frac{1}{\underset{\textit{hertz}}{f}}$$

Entre deux changements de sens consécutifs, il s'écoule une demi-période : c'est une ***alternance.***

Remarque. — Les électriciens, habituellement, ne font pas suivre le nombre exprimant la fréquence du nom de l'unité. Ils disent simplement un courant de fréquence 50, ou de fréquence 25.

Si N est le nombre de *périodes* pendant *t secondes*, la fréquence est $f = N : t$. Conformément à la règle de formation des noms des unités dérivées, l'unité de fréquence peut être appelée *période par seconde* (symbole *p/s*). Nous emploierons indifféremment l'une ou l'autre des expressions : *hertz* et *période par seconde*.

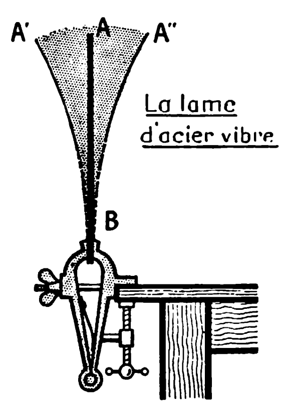


Fig. 4. — Une lame d'acier dont une extrémité est fixe vibre quand on la lâche après l'avoir écartée de sa position d'équilibre.

4. La mesure de la fréquence d'un courant alternatif est facile.

Le procédé de mesure de la fréquence indiqué dans le paragraphe précédent n'est pas pratique. On utilise industriellement des *fréquencemètres à lecture directe*.

Nous indiquerons seulement le principe du *fréquencemètre à lames vibrantes* souvent employé sur les tableaux de distribution.

Une lame d'acier, dont une extrémité est fixe (fig. 4) et l'autre libre, vibre quand elle est mise en mouvement par un moyen quelconque

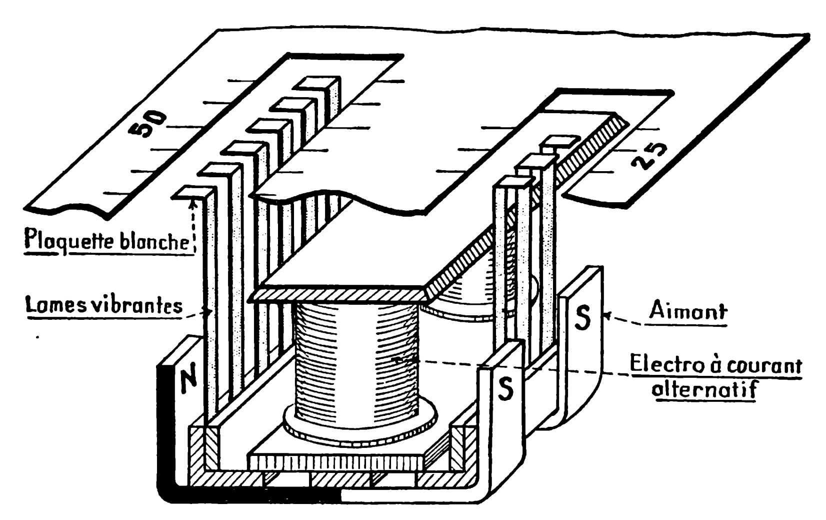


Fig. 5. — ***Fréquencemètre à lames vibrantes.*** A gauche pour courant de fréquence voisine de 50 ∿. A droite, ... 25 ∿.

avec une fréquence bien déterminée qui dépend seulement de la longueur et de l'épaisseur de la lame : c'est la *fréquence propre* de la lame.

Onze lames de même longueur sont ajustées pour donner, la première 45 vibrations par seconde, la deuxième 46..., la sixième 50..., la onzième 55. *Elles sont aimantées* dans le même sens et fixées sur un socle commun (fig. 5.)

Un électro-aimant (feuilleté), excité par le courant dont on veut mesurer la fréquence, agit sur les extrémités libres des lames. A chaque période du courant, les lames sont attirées pendant une alternance et repoussées pendant l'alternance suivante : elles vibrent. Celle de ces lames, qui, par construction, possède une fréquence de vibration propre égale à la fréquence du courant employé, vibre beaucoup plus fortement que les autres. Une petite plaquette blanche, placée en bout de chaque lame, rend la vibration visible de loin. Il suffit de lire le nombre correspondant à la lame qui vibre le plus fort pour connaître la fréquence du courant (fig. 6).

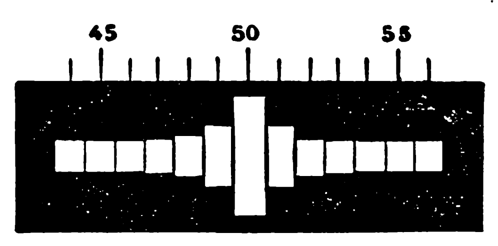


Fig. 6. — *Échelle d'un fréquencemètre.* — Remarquer que plusieurs lames vibrent, mais l'une beaucoup plus fort. Elle marque la fréquence 50.

5. Les fréquences utilisées sont différentes suivant les usages du courant.

Tous les grands réseaux de distribution de courant alternatif fournissent du courant de fréquence 50. Cette fréquence est invariable, si constante qu'elle règle la marche de nombreuses horloges et pendules électriques.

Pour la *traction électrique*, on emploie parfois des fréquences 15 et 25. On commande certaines *machines-outils* avec des moteurs qui reçoivent du courant à la fréquence 100. On construit des *alternateurs pour la TSF* fournissant du courant de 1 000 à 30 000 cycles. En TSF, des fréquences de l'ordre de 10 millions de hertz sont utilisées.

6. Conclusion.

A cause de leurs changements de sens si fréquents, les courants alternatifs possèdent des propriétés différentes de celles du courant continu dans les circuits possédant de la self-induction et de la capacité.

Nous ne pourrons qu'étudier sommairement leurs propriétés particulières essentielles. Pour une étude plus complète, il faut se servir de connaissances mathématiques que vous n'avez pas.

Exercices.

1. Expliquez comment avec une boussole vous pouvez reconnaître :
1° si un fil de canalisation est parcouru par un courant;
2° la nature de ce courant : continu ou alternatif;
3° le sens du courant s'il est continu.

2. — Même question, en utilisant au lieu de boussole un papier de tournesol imbibé d'eau salée.

3. Du filament de carbone d'une lampe à incandescence d'ancien modèle, fonctionnant avec du courant alternatif, on approche un pôle d'aimant. Que se passe-t-il? Expliquer le fait constaté.

4. Si l'on reprenait l'expérience décrite au premier paragraphe de la leçon avec du courant alternatif à très basse fréquence ($f = 3$ ou 4), les phénomènes que l'on observerait seraient-ils différents de ceux que l'on a constatés?

5. On déplace rapidement la main éclairée par un arc électrique.
Qu'observe-t-on si l'arc est produit par du courant continu? par du courant alternatif?
On sait que l'arc s'éteint entre chaque alternance.

Variation de l'intensité d'un courant alternatif en fonction du temps.

Pour bien connaître un courant alternatif, il faut pouvoir tracer la courbe qui représente son intensité en fonction du temps pendant la durée d'une période. Or, cette durée est très brève : 0,02 seconde pour le courant alternatif usuel, 0,000 01 seconde et même beaucoup moins pour les courants de TSF. On sait pourtant construire des appareils capables d'enregistrer des variations d'intensité aussi rapides : ce sont des *oscillographes.*

I. Principe des oscillographes électromagnétiques.

Construisons un oscillographe très simple qui nous sera fort utile dans quelques leçons ultérieures.

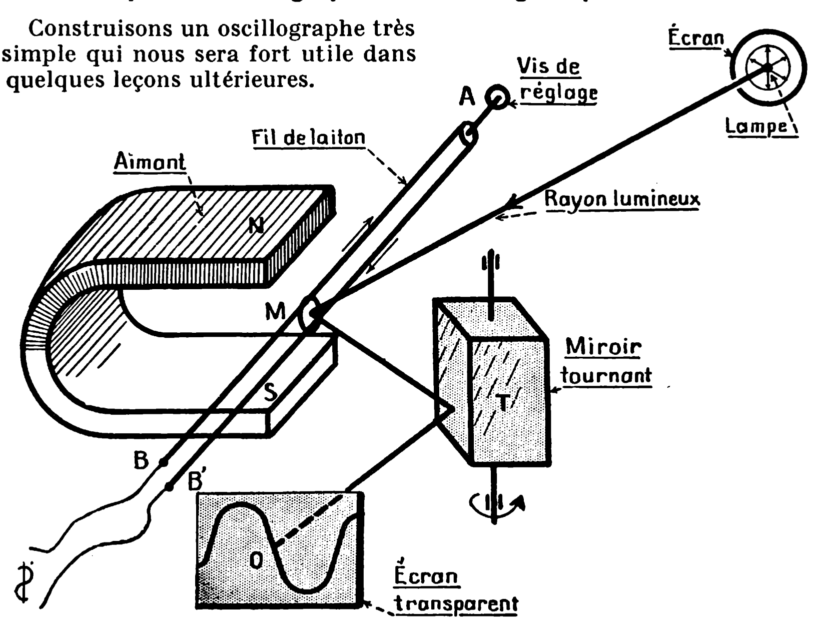


Fig. 1. — Schéma d'un *vibreur de démonstration* traçant la courbe d'un courant alternatif. Les flèches le long de BA et de AB' indiquent le sens du courant à *un instant donné.*

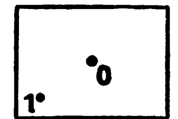
Un fil de laiton de diamètre 0,2 *mm*, long de 50 *cm* est plié en une boucle BAB′ dont les deux brins sont horizontaux et dans un même plan vertical; ils sont distants de 3 à 4 *mm* et sont tendus par une vis de réglage A (fig. 1).

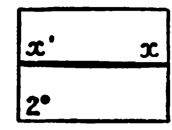
Un miroir de galvanomètre M est collé, sur les deux fils, au milieu de la boucle.

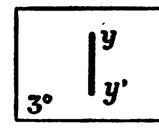
La région moyenne de la boucle est placée entre les pôles d'un puissant aimant en fer à cheval NS dont le champ est vertical. Un rayon lumineux venant d'une forte lampe est réfléchi d'abord sur le miroir M, ensuite sur un miroir tournant[1] T et donne une image O sur un écran (fig. 2).

1° Si les miroirs M et T sont immobiles, le point lumineux O, ou spot, est immobile (fig. 2, 1°).

2° Si le *miroir M étant immobile*, nous mettons en *mouvement le miroir tournant*, le point lumineux décrit une droite horizontale $x'x$ sur l'écran (fig. 2, 2°).







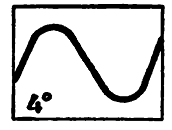


Fig. 2. — Aspect de l'écran de l'oscillographe électromagnétique. — 1° Le miroir M est éclairé, le miroir tournant est immobile, il n'y a pas de courant dans l'appareil; 2° le miroir tournant T est en mouvement; 3° le miroir tournant T est arrêté, un courant alternatif passe dans l'oscillographe; 4° un courant alternatif passe dans l'oscillographe et le miroir tournant est en mouvement avec une vitesse convenable.

3° Si le miroir tournant étant arrêté, nous faisons passer un cou rant alternatif de quelques dixièmes d'ampères dans la boucle BAB′, *le miroir M oscille* et le point O décrit une droite verticale $y'y$ sur l'écran.

C'est que les deux branches de la boucle sont parcourues par le même courant, qui, à un instant donné, va de B vers A, par exemple, et de A vers B′; les deux fils sont soumis, dans le champ de l'aimant, à des forces horizontales de sens contraires qui tordent la boucle dans son milieu.

Une alternance après l'instant considéré, le courant a changé de sens dans les deux brins et la boucle est tordue en sens contraire. La boucle est donc tordue alternativement dans les deux sens : le miroir M vibre en tournant autour de l'axe horizontal de la boucle BAB′.

4° Quand un courant alternatif passe dans l'appareil et que le miroir tournant fait, par seconde, un nombre de tours convenable[2], *le*

1. Le miroir tournant se compose de 4 (ou 6, ou 8) miroirs plans collés sur les faces d'un parallélépipède à section carrée (ou hexagonale ou octogonale). La construction en est facile dans les ateliers d'une ENP, ainsi que celle de l'oscillographe lui-même.

2. Il faut qu'une face du miroir prenne exactement la même position que la face qui la précède au bout de une, deux, trois... périodes du courant étudié.

spot décrit plusieurs fois la même courbe sur l'écran à chaque tour du miroir. A cause de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, l'observateur voit une courbe continue.

Les abscisses de cette courbe sont fonction du temps, les ordonnées sont fonction de l'intensité du courant : la courbe est une représentation graphique des variations du courant en fonction du temps[1].

Sur le même principe est construit l'*oscillographe Blondel* qui, très étudié et fabriqué avec un soin minutieux, donne la courbe exacte d'un courant ou d'une tension alternative : les ordonnées sont proportionnelles aux valeurs instantanées de l'intensité ou de la tension alternative.

Actuellement, dans les laboratoires et dans l'industrie, on utilise surtout des *oscillographes cathodiques.*

2. Principe des oscillographes cathodiques[2].

Une *ampoule* en verre, vidée aussi complètement que possible s'élargit à l'une de ses extrémités en un disque garni intérieurement d'un enduit à base de *tungstate de calcium* qui en fait un *écran fluorescent* (fig. 3).

A l'autre extrémité de l'ampoule, un filament métallique chauffé

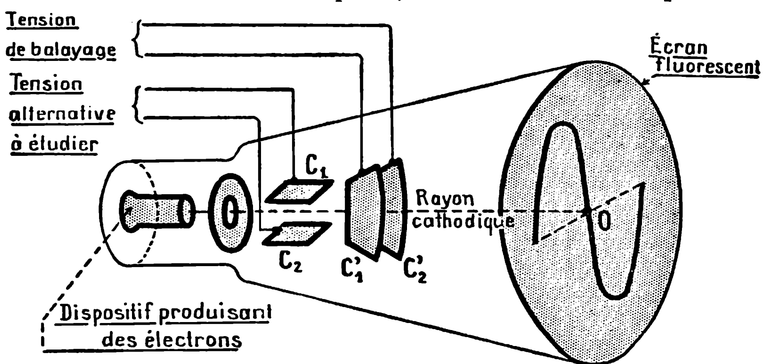


Fig. 3. — Schéma d'un tube d'*oscillographe cathodique.*

par du courant alternatif forme cathode; il émet des électrons qui sont attirés par une anode et concentrés, par un dispositif que nous ne décrirons pas, en un faisceau de très petit diamètre. Ce *rayon d'électrons* va frapper l'écran fluorescent et y donne une toute petite tache, un point lumineux O.

1. C'est en réalité la courbe des vibrations propres du fil de laiton. En tendant le fil par la vis de réglage A, *on amène la fréquence de ses vibrations propres à égaler celles du courant.* Le courant déclenche les vibrations, les entretient et les oriente normalement au champ de l'aimant; mais, dans la courbe obtenue, *les ordonnées ne sont pas proportionnelles aux intensités instantanées.*

Ce *vibreur* très simple et facile à construire n'est donc qu'un appareil de démonstration.

2. L'oscillographe cathodique est étudié plus complètement dans le 3e volume de cet ouvrage : *Notions d'électronique.*

Le rayon cathodique passe entre deux paires de plateaux C_1C_2 et $C'_1C'_2$. Deux de ces plateaux C_1 et C_2 sont horizontaux; on les connecte en deux points du conducteur parcouru par le courant que l'on veut étudier.

Pendant une alternance, C_1 est chargé positivement et C_2 négativement C_1 attire les électrons du rayon, C_2 les repousse; le rayon est dévié vers le haut.

Pendant l'alternance suivante, les charges des plateaux C_1 et C_2 ont changé de sens : le rayon d'électrons est dévié vers le bas.

Le rayon cathodique vibre dans un plan vertical et le spot décrit sur l'écran une droite verticale.

Les plaques C'_1 et C'_2 sont verticales. On y applique une tension périodique, dite *tension de balayage,* dont la fréquence réglable est égale à la fréquence du courant étudié ou à l'un de ses sous-multiples et *qui varie, pendant chaque période, proportionnellement au temps* (fig. 4.) Les charges électriques portées par les plaques $C'_1C'_2$ font osciller le rayon cathodique dans un *plan horizontal* et le chemin que parcourt horizontalement le spot est proportionnel au temps.

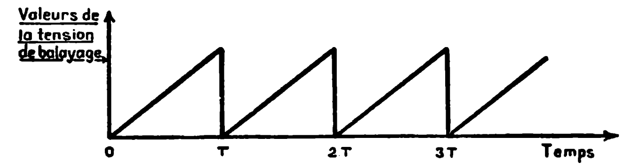


Fig. 4. — ***Courbe de la tension de balayage*** **établie entre les deux plaques C'_1 et C'_2 de l'oscillographe cathodique.**

Par l'action simultanée des deux paires de plateaux, le spot décrit une courbe qui est la courbe du courant : abscisses proportionnelles au temps, ordonnées proportionnelles à l'intensité ou à la tension alternative.

Le faisceau cathodique est sans masse, donc sans inertie. Il peut se mouvoir très vite. Avec un oscillographe cathodique, il est possible d'obtenir la courbe d'un courant alternatif dont la *fréquence atteint plusieurs millions de hertz.*

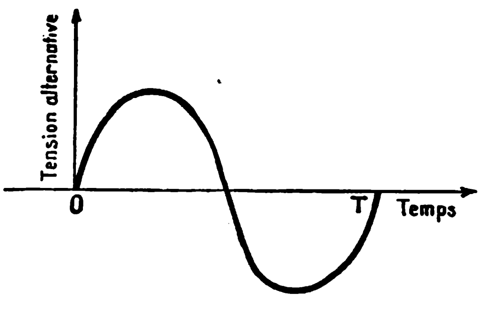


Fig. 5. — Courbe de la tension du réseau de distribution de l'Est de la France.

3. Examen de quelques courbes obtenues à l'oscillographe.

La figure 5 est la courbe de la tension du réseau de distribution de l'Est de la France.

La courbe figure 6 est celle de la tension d'un petit alternateur de construction récente fourni pour la salle d'essais d'une école. Nous

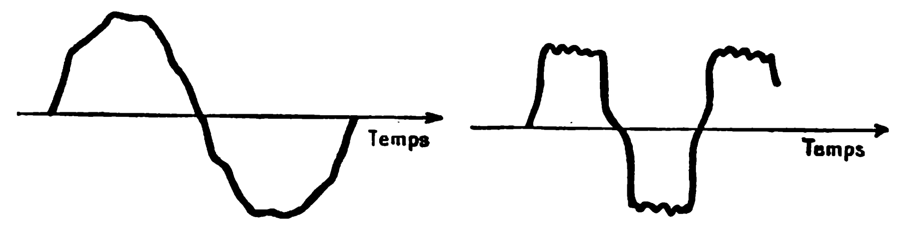


Fig. 6. — Courbe de la tension donnée par un petit alternateur de construction récente.

Fig. 7. — Courbe de la tension donnée par un alternateur mal conçu.

remarquons qu'elle est moins régulière que la précédente, tout en ayant, dans l'ensemble, la même forme.

La courbe reproduite par la figure 7 a été relevée sur un alternateur de démonstration construit dans une école : au cours d'une période, la variation de la tension est irrégulière.

La *représentation graphique* d'un phénomène variable, comme l'intensité d'un courant alternatif ou une tension alternative, est instructive parce qu'elle permet de voir l'ensemble et le détail de ses variations.

La *représentation mathématique* du phénomène, quand elle est possible, par une expression algébrique, est bien plus féconde. Elle donne le moyen d'appliquer le calcul algébrique à l'étude du phénomène et l'outil mathématique est très puissant. Dans la leçon qui suit, nous verrons par quelles formules on représente soit l'intensité d'un courant alternatif, soit une tension alternative.

Représentation mathématique d'un courant alternatif.

1. Rappelons la forme de la courbe représentant la fonction sinusoïdale : $y = a \sin x$.

Lorsque x varie de 0 à 2π, $\sin x$ et $y = a \sin x$ varient comme l'indique le tableau suivant :

x	0	↗	$\frac{\pi}{2}$	↗	π	↗	$\frac{3\pi}{2}$	↗	2π
$\sin x$	0	↗	1	↘	0	↘	-1	↗	0
$y = a \sin x$	0	↗	a	↘	0	↘	$-a$	↗	0

La figure 1 représente la variation de la fonction y : les valeurs de x sont portées en abscisses, celles de y en ordonnées.

La courbe est nommée *sinusoïde*, y est une fonction sinusoïdale de x.

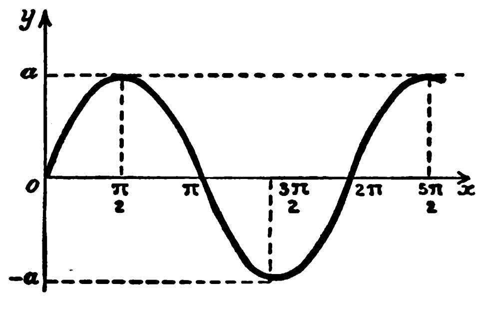


Fig. 1. Courbe représentant la fonction $y = a \sin x$.

2. Équation de la courbe d'un courant alternatif ou d'une tension alternative.

a) La courbe représentée par la figure 5 de la leçon précédente ressemble beaucoup à celle qui représente la fonction

$$y = a \sin x.$$

Cette ressemblance n'est pas fortuite : les constructeurs s'efforcent de fabriquer des alternateurs fournissant une force électromotrice qui soit une fonction sinusoïdale du temps.

L'une des raisons est que la fonction sinusoïdale est la plus simple des fonctions périodiques et admet des procédés de calcul assez faciles.

b) Les électriciens ont donc adopté pour représenter l'intensité d'un *courant sinusoïdal* la formule :

$$i = I_m \sin \omega t \qquad (1)$$

i est l'*intensité instantanée*, c'est-à-dire la valeur de l'intensité du courant à l'*instant t*,

I_m et ω sont des constantes; i est donc fonction du temps t et du temps seulement; t croissant à partir de 0, ωt croît à partir de 0; ωt passe, en particulier, par les valeurs remarquables $\frac{\pi}{2}$, π, $\frac{3\pi}{2}$, 2π... radians

i est nul quand l'angle ωt est nul ou quand il est égal à π, à 2π, à 3π.... radians.

i est égal à I_m quand ωt vaut $\frac{\pi}{2}$, à $-I_m$ pour $\omega t = \frac{3\pi}{2}$, etc....

I_m est l'*intensité maximum* du courant ou encore son *amplitude*.

Le courant reprend la *même intensité* et le *même sens* quand l'angle ωt a varié de 2π radians. La durée de cette variation est la *période T* du courant, donc :

$$\omega T = 2\pi$$

et, puisque la *fréquence f* est l'inverse de la période :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\frac{1}{T} = 2\pi f$$ *radians par seconde.*

On donne à la constante ω le nom de *pulsation* du courant. Plus grande est la pulsation, plus le courant varie rapidement.

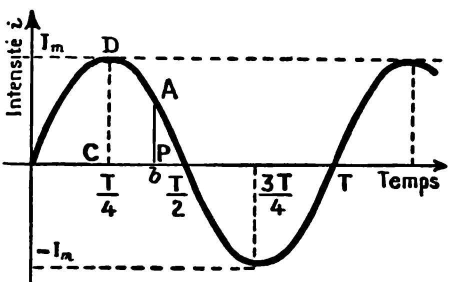


Fig. 2. — *Courbe du courant $i = I_m \sin \omega t$.* OT représente une période; PA est la valeur de i à l'instant t; CD est l'amplitude I_m du courant.

Dans le cas du courant alternatif usuel, dont la fréquence est 50 $\omega = 2 \times 3{,}14 \times 50 = 314$ radians par seconde.

Le tableau suivant résume les variations du courant i en fonction du temps t.

	0	↗	$\frac{1}{4}$T	↗	$\frac{1}{2}$T	↗	$\frac{3}{4}$T	↗	T	↗	$\frac{5}{4}$T...
$\omega t = \frac{2\pi t}{T}$	0	↗	$\frac{\pi}{2}$	↗	π	↗	$\frac{3\pi}{2}$	↗	2π	↗	$\frac{5\pi}{2}$...
sin ω	0	↗	1	↘	0	↘	—1	↗	0	↗	1 ...
$i = I_m \sin \omega t$	0	↗	I_m	↘	0	↘	$-I_m$	↗	0	↗	I_m ...

La figure 2 représente graphiquement la variation de i en fonction de t.

2. Déphasage de deux courants de même fréquence. — Décalage.

Un courant (2) de *même fréquence* que le courant (1) (fig. 3), mais prenant à d'autres instants les valeurs nulles et les valeurs maximums, est représenté par la formule :

$$i' = I'_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

On dit que ce courant (2) est *déphasé* par rapport au courant (1) de l'angle φ. Parce qu'il passe par les valeurs nulles ou maximums *après* le courant (1), on dit aussi qu'il est *en retard* ou *décalé* dans le temps sur le courant (1).

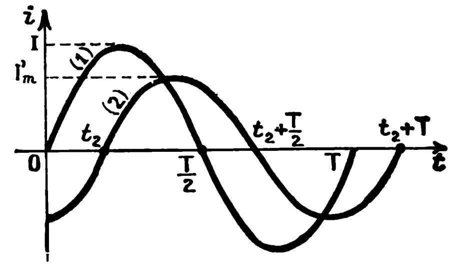


Fig. 3. — Le courant 2 est *décalé en arrière* du courant 1 parce qu'il passe par les valeurs nulles ou maximums après le courant 1.
Décalage : t_2. — *Déphasage :* $\varphi = 2\pi \frac{t_2}{T}$.

Si l'angle φ est égal à $\pi : 2$, le retard est de un quart de période (fig. 4) : les deux courants sont en *quadrature*.

Si $\varphi = \pi$, le retard est d'une demi-période, les deux courants sont en *opposition* (fig. 5).

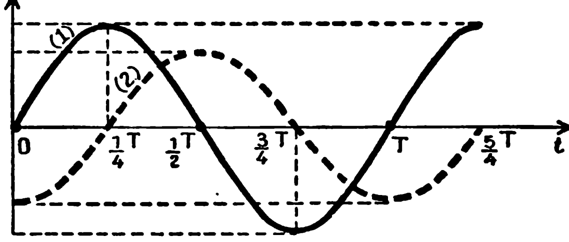


Fig. 4. — Le courant (2) est *décalé* de 1/4 de période sur le courant (1); ce qui correspond à un *déphasage* en arrière d'un angle $\frac{\pi}{2}$.

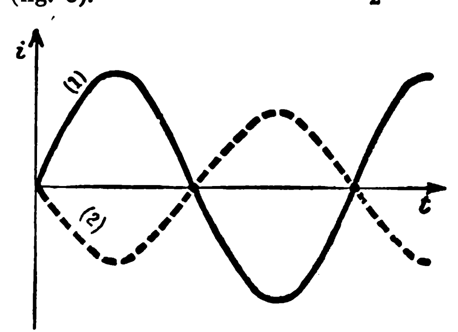


Fig. 5. — **Le courant (2) *décalé* d'une demi-période sur le courant (1), il est *déphasé* en arrière du courant (1) d'un angle $\varphi = \pi$.**

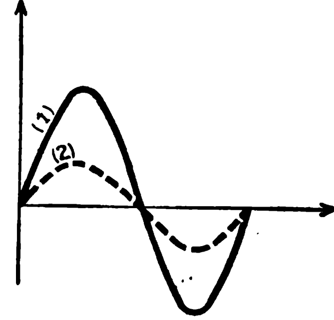


Fig. 6. — Les deux courants passent en même temps par leurs valeurs nulles au maximum : ils sont en *phase* ($\varphi = 0$). Le *décalage* est nul.

Si $\varphi = 0$, les courants sont *en phase* (fig. 6).

Le courant représenté par

$$i' = I_m \sin(\omega t + \varphi) \qquad (3)$$

est déphasé de l'angle φ *en avance* sur le courant $i = I_m \sin \omega t$.

3. Représentation d'une f. é. m. ou d'une tension sinusoïdales.

De la même façon, on représentera une f. é. m. ou une tension par les formules :

$$e = E_m \sin \omega t$$
$$e' = E_m \sin(\omega t - \varphi)$$
$$u = U_m \sin \omega t$$
$$u' = U_m \sin(\omega t - \varphi).$$

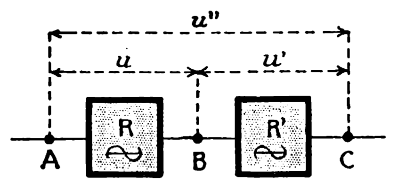


Fig. 7. — R et R' sont deux récepteurs à courant alternatif. Les tensions sinusoïdales *u* et *u'* sont montées en série. *La tension u" entre* A *et* C *est, à chaque instant, la somme des tensions u entre* A *et* B *et u' entre* B *et* C.

4. Représentation vectorielle de tensions ou de courants sinusoïdaux.

Proposons-nous de résoudre le problème suivant :

On monte en série (fig. 7) *deux tensions sinusoïdales u et u' de même fréquence et de même amplitude déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle φ. Quelle est la somme de ces deux tensions?*

1° ***Solution graphique.***

Dessinons *à la même échelle*, sur la même figure 8, les deux sinusoïdes

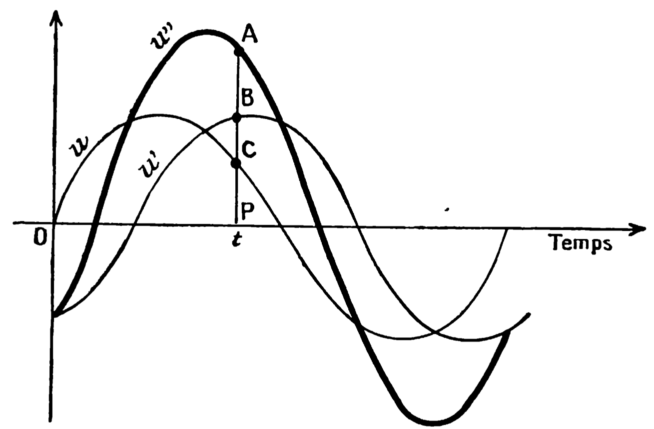


Fig. 8. — En un point d'abscisse quelconque *t*, PA = PB ± PC : la tension *u"* est la somme des tensions *u* et *u'*. Les trois tensions ont même fréquence.

représentant les tensions u et u'. A chaque instant t, nous obtenons la somme PA des deux tensions en additionnant les ordonnées PB et PC des deux sinusoïdes, *compte tenu de leur sens* (addition algébrique).

Traçons la courbe de la somme point par point. C'est une sinusoïde de même période que les composantes. Nous pouvons en mesurer l'amplitude sur la figure ainsi que le déphasage par rapport à la tension u.

Ce mode de résolution s'appliquerait de la même façon si les deux tensions avaient les amplitudes et même des fréquences différentes, mais il n'est ni rapide ni précis.

2° ***Solution algébrique.***

Représentons les deux tensions sinusoïdales par les fonctions :

$$u = U_m \sin \omega t$$
$$u' = U_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Leur somme à l'instant t est :

$$u'' = u + u' = U_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - \varphi)]$$

En appliquant la formule trigonométrique :

$$\sin a + \sin b = 2 \sin \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2}$$

transformons en produit la somme entre crochets :

$$u'' = u + u' = \underbrace{2U_m \cos \frac{\varphi}{2}}_{\text{quantité constante}} \quad \underbrace{\sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right)}_{\substack{\text{quantité variable} \\ \text{(fonction de la variable } t)}}.$$

La tension résultante u'' a pour amplitude $2U_m \cos \frac{\varphi}{2}$; elle a même fréquence que les composantes, puisque la pulsation ω est la même; elle est déphasée par rapport aux composantes de l'angle $\frac{\varphi}{2}$.

Le calcul serait plus difficile si les amplitudes des deux tensions étaient différentes; l'emploi des formules trigonométriques est quelque peu rébarbatif : il existe un troisième procédé de résolution du problème posé plus commode que les précédents parce qu'il est graphique.

3° ***Solution vectorielle.***

Employons un mode de représentation des fonctions sinusoïdales dû à Fresnel[1].

La fonction

$$u = U_m \sin \omega t$$

est représentée (fig. 9) par un vecteur $\overrightarrow{OM}$ dont la longueur est U_m qui

1. Fresnel (1788-1827), ingénieur français, est célèbre surtout à cause de ses recherches sur la lumière.

tourne autour du centre du cercle O dans le sens AB avec une vitesse angulaire constante de ω radians par seconde. A l'instant 0, ce vecteur est en OA ; à l'instant t, il est en OM ; l'angle AOM vaut ωt radians. La projection $\overrightarrow{Om}$ du vecteur sur l'axe OB est égale à OM sin ωt, c'est-à-dire à u.

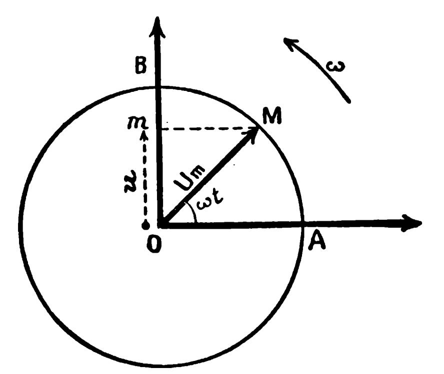


Fig. 9. — Représentation vectorielle d'une fonction sinusoïdale. Om = OM sin ωt ou $u = U_m \sin \omega t$.

Le vecteur tournant $\overrightarrow{ON}$ (fig. 10), déphasé en arrière du précédent de l'angle φ, représente la fonction

$$u' = U_m \sin(\omega t - \varphi)$$

puisque

$$\overrightarrow{On} = \text{ON} \sin(\omega t - \varphi).$$

Construisons la ***somme géométrique*** des deux vecteurs, c'est-à-dire leur résultante, en appliquant la règle du parallélogramme. La projection $\overrightarrow{Op}$, sur OB, du vecteur obtenu $\overrightarrow{OP}$, est la somme des projections $\overrightarrow{Om}$ et $\overrightarrow{On}$ des deux composantes : le vecteur tournant OP représente donc la somme des deux tensions sinusoïdales u et u'.

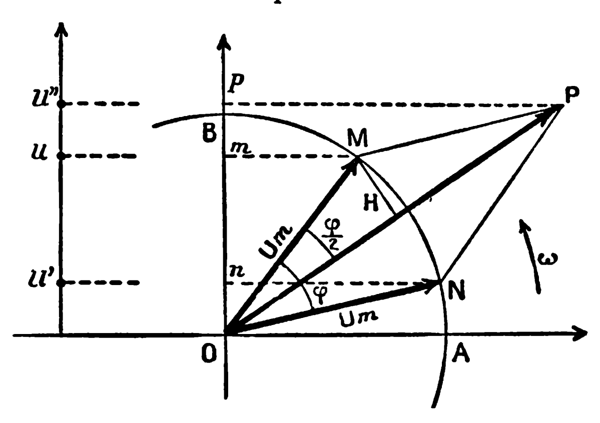


Fig. 10. — Représentation vectorielle de deux tensions u et u' et détermination de leur somme u''.

Le vecteur $\overrightarrow{OP}$ est déphasé de l'angle $\frac{\varphi}{2}$ sur le vecteur $\overrightarrow{OM}$. Il est la base du triangle isocèle OMP ; sa valeur est :

$$\text{OP} = 2\text{OH} = 2\text{OM} \cos\frac{\varphi}{2} = 2U_m \cos\frac{\varphi}{2}.$$

Donc, la somme des deux tensions

$$u = U_m \sin \omega t$$
$$u' = U_m \sin(\omega t - \varphi)$$

est

$$u'' = u + u' = 2U_m \cos\frac{\varphi}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right).$$

REMARQUES. — 1° Le cercle O ne sert pas dans les constructions : nous ne le tracerons plus à l'avenir.

2° La solution vectorielle est identique si les amplitudes des deux fonctions diffèrent; mais *la méthode n'est pas applicable si la fréquence des deux tensions n'est pas la même.*

4. Addition et soustraction de deux vecteurs.

Rappelons les règles de ces deux opérations graphiques que l'on a souvent à effectuer quand on emploie le mode de représentation de Fresnel.

Addition. — *a*) On vient de voir dans le paragraphe 3 que la ***somme géométrique*** de deux vecteurs ayant même origine est la diagonale, partant de cette origine, du parallélogramme construit sur les deux vecteurs (fig. 10).

b) On peut aussi (fig. 11) tracer les deux vecteurs $\overrightarrow{OM}$ et $\overrightarrow{MN}$ **à la suite** l'un de l'autre en tenant compte de leur direction et de leur sens : leur somme est le vecteur $\overrightarrow{ON}$ qui joint l'origine du premier à l'extrémité du second. Cette construction est une simplification de la précédente.

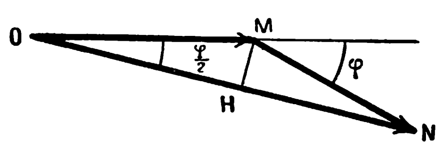


Fig. 11. — Autre forme du diagramme vectoriel. $\overrightarrow{OM} + \overrightarrow{MN} = \overrightarrow{ON}$.

Elle se généralise facilement pour obtenir la somme d'un nombre quelconque de vecteurs.

Soustraction. — Soit à construire la différence $\overrightarrow{ON} - \overrightarrow{OM}$.

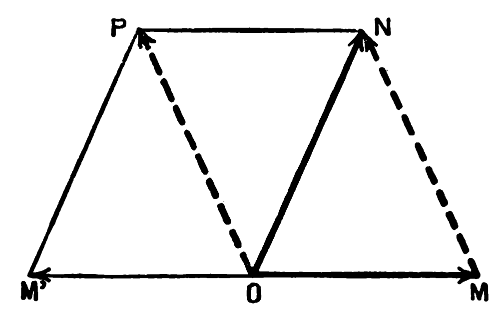


Fig. 12. — Construction de la différence de deux vecteurs $\overrightarrow{ON} - \overrightarrow{OM} = \overrightarrow{ON} + \overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OP} = \overrightarrow{MN}$.

a) On construit (fig. 12) le vecteur $\overrightarrow{OM'}$ égal à $-\overrightarrow{OM}$ et l'on fait la somme $\overrightarrow{OP}$ des deux vecteurs $\overrightarrow{ON}$ et $\overrightarrow{OM'}$.

b) Ou bien, plus simplement, on joint les *extrémités* M et N des deux

vecteurs dont on cherche la différence : le vecteur $\overrightarrow{MN}$ (fig. 12) est égal à $\overrightarrow{ON} - \overrightarrow{OM}$; ce vecteur est, en effet, de même direction, de même sens de même longueur que le vecteur $\overrightarrow{OP}$.

Remarquer que le vecteur $\overrightarrow{MN} = \overrightarrow{ON} - \overrightarrow{OM}$ a pour :

origine M, **l'extrémité du second vecteur $\overrightarrow{OM}$**

extrémité N, **l'extrémité du premier vecteur $\overrightarrow{ON}$.**

Exercices.

1. **Construire la courbe de la fonction**

$$y = 4 \sin x$$

Échelles des abscisses : 1 *radian* = 2 *cm*.
Échelle des ordonnées : 1 *unité* = 1 *cm*.
Construire avec les mêmes axes et à la même échelle la courbe

$$y = 4 \cos x.$$

Comparer les deux courbes et justifier les constatations faites.

2. Construire avec les mêmes axes de coordonnées les courbes des deux courants en quadrature :

$$i = 5 \sin 628\, t \text{ ampères}$$
$$i' = 4 \sin\left(628\, t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ ampères.}$$

On représentera 1 ampère par centimètre et $\frac{1}{100}$ seconde par 10 centimètres.

3. Écrire l'équation d'un courant sinusoïdal dont la fréquence est 1 et l'intensité maximum 10 ampères.

4. Quelle est la fréquence du courant

$$i = 5 \sin(314\, t - \pi) \text{ ampères.}$$

5. Représenter par des vecteurs les deux tensions en quadrature

$$e = 6 \sin \omega t \text{ volts}$$
$$e' = 4 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ volts.}$$

1 volt sera représenté par 1 centimètre.

6. Déterminer par la méthode vectorielle la somme des deux courants

$$i = 5 \sin 628\, t \text{ ampères}$$
$$i' = 4 \sin\left(628\, t - \frac{\pi}{6}\right) \text{ ampères.}$$

7. Démontrer que la différence de phase φ entre les courants 1 et 2 de la figure 3 est $\varphi = \omega t_2$, ω étant la pulsation commune aux deux courants, t_2 le retard du courant 2 sur le courant 1.

Étudier le cas particulier où $t_2 = \frac{T}{4}$.

Intensité efficace d'un courant alternatif.

1. Expériences.

Sur le secteur qui nous fournit du courant alternatif de fréquence 50 *p/s*, installons une lampe à incandescence, et, avec une lentille, projetons le filament sur un écran.

Nous observons que la *brillance* du filament ne subit pas de variations sensibles. Pourtant nous savons que le courant qui traverse le fil varie, pendant chaque alternance, entre une valeur nulle et une valeur maximum. Mais ces variations sont très rapides.

Alimentons la lampe avec du courant à plus *basse fréquence*, 10 par exemple[1]. La lampe « papillote ». *Le filament passe alternativement du rouge sombre à un éclat plus vif.* Nous remarquons qu'il ne devient pas complètement obscur, même pendant un instant très court.

S'il ne se refroidit pas complètement pendant que l'intensité du courant diminue et s'annule, nous sommes fondés à admettre qu'il ne s'échauffe pas au maximum pendant que l'intensité croît et atteint sa plus grande valeur. Nous allons déterminer l'*effet calorifique moyen* du courant.

2. Action d'un courant alternatif sur un ampèremètre thermique.

Expérience. — Dans un circuit parcouru par un courant alternatif, montons en série deux *ampèremètres thermiques* de construction différente.

Ils donnent tous deux la même indication : 12, par exemple (fig. 1).

Cette indication, puisqu'elle est indépendante des instruments, caractérise le courant alternatif qui les traverse. Quelle signification a-t-elle? Quelle grandeur avons-nous mesurée?

Les ampèremètres employés sont gradués avec du courant continu.

1. Dans une salle de cours d'électricité, on doit disposer de fréquences différentes. Par exemple, les fréquences de 5 à 25 sont fournies par une commutatrice à excitation constante à 220 volts dont l'induit est alimenté à tension variable jusqu'à 110 volts. La fréquence 50 est donnée par le secteur.

Traversés par un courant alternatif, ils indiquent donc l'intensité du courant continu qui produit, dans ces appareils, pendant le même temps, la même quantité de chaleur que le courant alternatif.

Nous nommerons cette intensité ***intensité efficace*** du courant

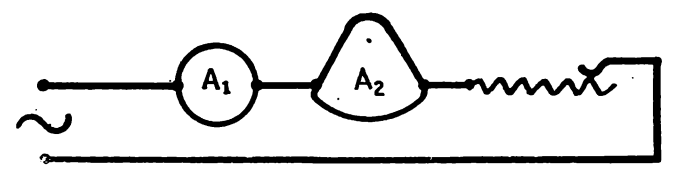


Fig. 1. — Deux ampèremètres thermiques, A_1 et A_2, même de construction différente, donnent des indications identiques quand on les monte en série sur le même courant alternatif.

alternatif et nous en donnerons les deux définitions suivantes qui sont équivalentes :

1° *l'intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité indiquée par un ampèremètre thermique traversé par ce courant;*

2° *l'intensité efficace d'un courant alternatif est mesurée par le même nombre que l'intensité du courant continu qui produit la même énergie calorifique dans les mêmes conditions (même résistance, même temps).*

3. L'intensité efficace d'un courant alternatif sinusoïdal est égale à l'intensité maximum divisée par $\sqrt{2}$.

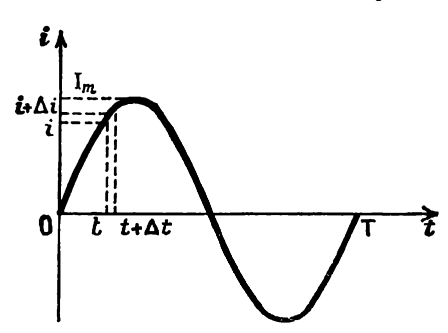


Fig. 2. — Pendant l'intervalle de temps Δt, l'intensité du courant varie de Δi. Si Δt est très petit, l'intensité du courant pendant cet intervalle de temps peut être considérée comme constante et égale à i.

a) ***Démonstration graphique.***

Soit R la résistance traversée par le courant

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Proposons-nous de déterminer l'énergie calorifique produite par le courant pendant la durée T d'une période.

Traçons la courbe de l'intensité i en fonction de t (fig. 2).

A chaque instant, l'intensité du courant varie. Considérons un intervalle de temps *très petit* Δt; l'intensité varie de i à une valeur *très voisine* $i + \Delta i$; nous pouvons admettre qu'elle garde la même valeur i pendant cet intervalle : l'énergie calorifique dégagée dans la résistance R est $Ri^2\Delta t$.

Construisons, par points, la courbe de i^2 à partir de celle de i

(fig. 3) : c'est une *sinusoïde* qui ne traverse pas l'axe des abscisses et dont la période est T : 2.

Soient m le point d'abscisse t et q le point d'abscisse $t + \Delta t$. La surface $mnpq$ est sensiblement un trapèze dont la hauteur est Δt et la moyenne des bases, à très peu près, i^2; cette surface $mnpq$ est égale à $i^2 \Delta t$.

Il suffit donc de multiplier par R la mesure de la surface $mnpq$ pour avoir l'énergie calorifique dégagée par le courant, pendant l'intervalle de temps Δt, dans la résistance R.

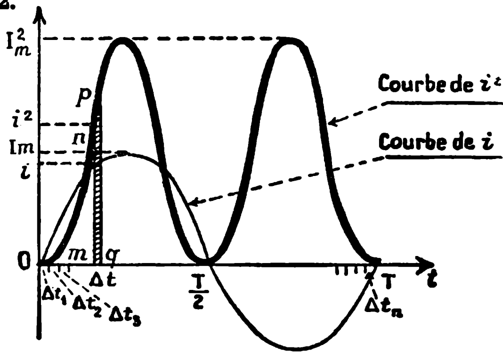


Fig. 3. — La surface $mnpq$ a pour mesure $i^2 \times \Delta t$. En multipliant cette mesure par R, on obtient la mesure $RI^2 \Delta t$ de l'énergie calorifique cédée par le courant pendant l'intervalle de temps Δt.

Le même raisonnement, fait pour chacun des intervalles Δt_1, Δt_2, ... Δt_n, compris entre O et T, montre qu'il faut multiplier par R la mesure de la surface OABCD

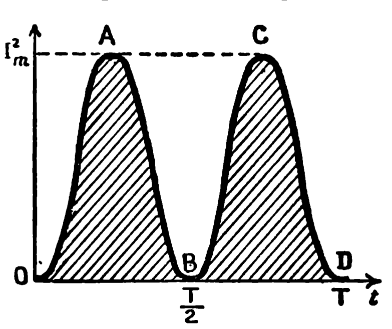


Fig. 4. — L'énergie calorifique dégagée par le courant alternatif, d'intensité maximum I_m, pendant une période T, est égale au nombre qui mesure la surface couverte de hachures, OABCD, multiplié par la résistance R du conducteur traversé par le courant.

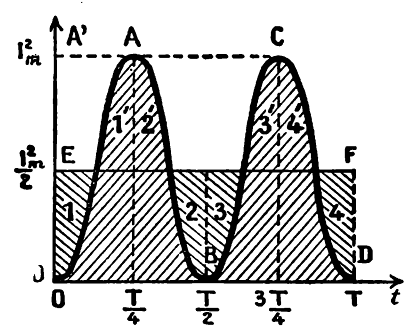


Fig. 5. — La surface OABCD couverte de hachures est égale à la surface du rectangle OEFD; elle a donc pour mesure $\frac{I_m^2}{2} \times T$.

(fig. 4), pour obtenir la valeur de l'énergie calorifique dégagée par le courant dans la résistance R pendant une période T.

Par le milieu E de OA', traçons EF parallèle à OD (fig. 5) :

$$OE = OA' : 2 = I_m^2 : 2.$$

Les surfaces hachurées 1′ et 1, 2′ et 2, etc..., au-dessus et au-dessous de cette droite, sont égales. Donc la surface du rectangle OEFD est égale à la surface OABCD. Cette surface a pour valeur

$$OE \times OD = \frac{I_m^2}{2} \times T.$$

Par suite, l'énergie calorifique dégagée par le courant pendant une période est : $R\frac{I_m^2}{2}T$.

Un courant continu d'intensité I qui passerait dans la même résistance R, pendant le même temps T, dégagerait une énergie calorifique égale à RI^2T.

Pour que cette énergie soit égale à celle que produit le courant alternatif, c'est-à-dire pour que I soit l'*intensité efficace* cherchée, il faut que :

$$RI^2T = R\frac{I_m^2}{2}T$$

$$I^2 = \frac{I_m^2}{2}$$

$$\boxed{I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.}$$

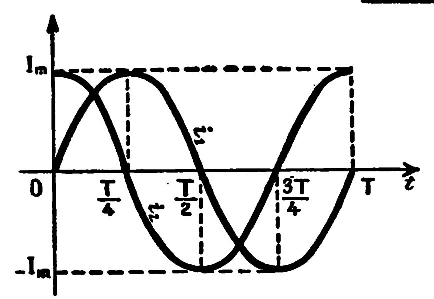


Fig. 6. — Les deux courants sinusoïdaux $i_1 = I_m \sin \omega t$ et $i_2 = I_m \cos \omega t$ ont même amplitude et même période. Ils ne diffèrent que par leur déphasage, i_1 étant en retard de 1/4 de période sur i_2.

Ils ont évidemment même intensité efficace, puisqu'ils sont *identiques* à ce déphasage près.

b*) *Démonstration algébrique.
Les deux courants sinusoïdaux:

$$i_1 = I_m \sin \omega t \qquad (1)$$
$$i_2 = I_m \cos \omega t \qquad (2)$$

ont même période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et même amplitude I_m.

Parce que

$$\cos \omega t = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

le second courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en avant du premier (fig. 6). A part ce déphasage, les deux courants sont identiques : ils ont donc la même intensité efficace I; dans des résistances égales R, ils dégagent l'un et l'autre, pendant la durée d'une période T, *la même quantité d'énergie calorifique RI^2T.*

A un instant quelconque t, la *puissance calorifique instantanée* dégagée dans la résistance R par le courant (1) est

$$Ri_1^2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t$$

et par le courant (2) :

$$Ri_2^2 = RI_m^2 \cos^2 \omega t.$$

La somme de ces deux puissances instantanées :

$$R(i_1^2 + i_2^2) = RI_m^2(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = RI_m^2$$

est constante.

Il en résulte que *la somme des énergies calorifiques dégagées par les deux courants pendant la durée T d'une période est égale à RI_m^2T.*

Mais, d'après ce qui précède, cette somme a aussi pour valeur

$$2\,RI^2T.$$

Donc:

$$2\,RI^2T = RI_m^2T$$

d'où:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ I_m.$$

Remarques. — 1. Cette relation entre l'intensité efficace I et l'intensité maximum I_m n'est exacte que pour un courant *sinusoïdal.*

2. Quand on indique l'intensité d'un courant alternatif sans plus de précision, c'est de l'intensité efficace qu'il s'agit.

Nous désignerons toujours par i l'*intensité instantanée*, par I_m l'*intensité maximum*, par I l'*intensité efficace* d'un courant alternatif.

4. Force électromotrice efficace. Tension efficace.

3. Nous savons qu'un voltmètre thermique est un ampèremètre très sensible et très résistant gradué en volts.

a) Montons un voltmètre thermique gradué pour une tension continue entre les bornes d'un générateur de courant alternatif (qui fonctionne à vide, c'est-à-dire qui ne débite pas de courant); l'appareil est traversé par un courant alternatif de faible intensité. Nous pouvons répéter pour ce courant tout ce qui est écrit dans le paragraphe précédent et conclure ainsi :

1° *la f. é. m. indiquée par un voltmètre thermique branché entre les bornes d'un générateur de courant alternatif se nomme la f. é. m. efficace du générateur;*

2° dans le cas d'une f. é. m. sinusoïdale, la f. é. m. efficace est le quotient de la f. é. m. maximum E_m par $\sqrt{2}$

$$\boxed{E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}}$$

b) De même, en plaçant un voltmètre thermique en dérivation entre deux points quelconques d'un circuit parcouru par un courant alterna-

tif, la tension U qu'indique l'instrument est la *tension efficace* entre les deux points considérés.

Dans le cas d'une tension sinusoïdale :

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

REMARQUES. — 1. Quand on indique la valeur d'une tension ou d'une f. é. m. alternatives sans plus de précision, c'est toujours de la tension efficace ou de la f. é. m. efficace qu'il s'agit.

Nous représenterons par e et u les valeurs *instantanées*, par E_m et U_m les valeurs *maxima*, par E et U les valeurs *efficaces* d'une f. é. m. ou d'une tension alternatives.

2. Un appareil à courant alternatif doit être isolé pour la tension maximum entre ses bornes et non pour la tension efficace.

Exercices.

1. **Un courant alternatif de fréquence 50 *p/s* a une *intensité efficace* de 5 ampères.**

1° Quelle est son *intensité maximum?*

2° Quelle est son *intensité instantanée* aux instants :

$$t_0 = 0, \qquad t_1 = \frac{1}{12}T, \qquad t_2 = \frac{2}{12}T \ldots t_{11} = \frac{11}{12} . T,$$

l'instant t_0 étant celui où le courant s'annule en passant du sens négatif au sens positif.

3° Tracer la courbe de l'intensité instantanée *i* :

Échelle des temps : 12 *cm* pour 0,02 *s*.

Échelle des intensités : 0,5 *cm* pour *t* A.

Tracer également la courbe de l'intensité efficace I en utilisant les mêmes échelles.

2. **Pour quelle tension doit être isolée une ligne de transport d'énergie à 220 000 volts alternatifs?**

3. **Faut-il prévoir les fusibles d'un circuit à c. a. pour l'intensité efficace ou pour l'intensité maximum du courant?**

NOTE COMPLÉMENTAIRE.

Intensité moyenne d'un courant.

Quand un courant n'est pas constant, on peut considérer :

1° l'***intensité efficace*** I, nous l'avons étudié dans cette leçon;

2° l'***intensisé moyenne*** I_{moy} : *c'est l'intensité du courant constant qui transporte la même quantité d'électricité que le courant variable pendant le même temps.*

Calculons l'intensité moyenne d'un courant alternatif sinusoïdal.

Remarquons d'abord que, pendant chaque alternance, la quantité d'électricité transportée est la même; mais, pendant une alternance, l'électricité est transportée dans un sens; elle est transportée en sens contraire pendant l'alternance suivante; de sorte que, pendant une période, la quantité d'électricité transportée est nulle : *l'intensité moyenne d'un courant alternatif sinusoïdal correspondant à une période est nulle.* C'est la raison pour laquelle on ne considère l'intensité moyenne que pendant une alternance.

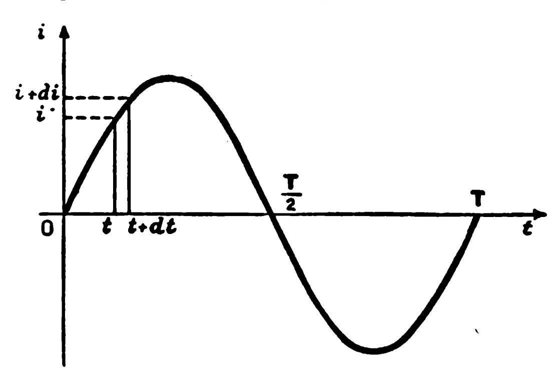


Fig. 7. — Courbe d'un courant alternatif : de l'instant t à l'instant $t + dt$, l'intensité varie de i à $i + di$.

Soit i l'intensité à un instant donné t (fig. 7). Pendant l'intervalle de temps très petit dt qui suit cet instant t, le courant varie de i à $i + di$, mais la variation di est infiniment petite et nous pouvons dire que l'intensité a pour valeur i pendant le temps dt.

La quantité d'électricité transportée pendant cet intervalle de temps dt est donc égale à idt.

La quantité transportée pendant une alternance, c'est-à-dire depuis le temps 0 jusqu'au temps T : 2, est :

$$q = \int_0^{\frac{T}{2}} idt.$$

Puisque le courant est sinusoïdal :

$$i = I_m \sin \omega t, \qquad \left(\omega = \frac{2\pi}{T}\right)$$

$$q = \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t \, dt$$

$$= - I_m \frac{1}{\omega} [\cos \omega t]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$= - I_m \frac{T}{2\pi}\left(\cos \frac{2\pi T}{T\,2} - \cos 0\right)$$

$$= - I_m \frac{T}{2\pi}(\cos \pi - \cos 0)$$

$$= \frac{I_m T}{\pi}.$$

Fig. 8. — L'intensité moyenne pendant une alternance d'un courant sinusoïdal est égale à 0,636 I_m.

Soit I_{moy} l'intensité du courant constant qui transporte la même quantité q pendant le même temps $\frac{T}{2}$.

Nous avons :

$$q = I_{moy} \times \frac{T}{2}$$

d'où :

$$I_{moy}\frac{T}{2} = \frac{I_m T}{\pi}$$

$$I_{moy} = \frac{2I_m}{\pi} = 0{,}636\ I_m.$$

Nous savons que l'intensité efficace I d'un courant alternatif sinusoïdal a pour valeur :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ I_m.$$

L'intensité moyenne, dans le cas d'un courant sinusoïdal est donc un peu inférieure à l'intensité efficace.

C'est de cette intensité moyenne qu'il faut tenir compte quand le courant alter-

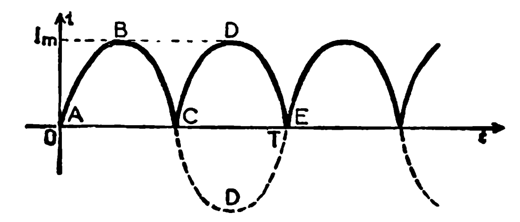


Fig. 9. — Le courant alternatif ABCDE a ses alternances négatives, telles que CDE, remplacées par des alternances positives CD'E. Le courant ABCD'E est un *courant redressé*.

natif est *redressé* (fig. 9) pour être employé à produire des phénomènes d'électrolyse, par exemple à charger des accumulateurs.

L'intensité moyenne est mesurée par l'indication d'un ampèremètre polarisé, par exemple un ampèremètre à cadre mobile et aimant.

On peut comme on l'a fait pour les valeurs efficaces, définir et calculer la ***tension moyenne***.

Appareils de mesure pour courant alternatif.

Nous avons vu[1] qu'il existe des ampèremètres et des voltmètres pour courant continu qui ne sont pas polarisés, c'est-à-dire qui fonctionnent quel que soit le sens du courant. L'aiguille de ces appareils dévie quand ils sont traversés par du courant alternatif. On peut les employer avec les deux sortes de courants.

Certains ne portent qu'une seule graduation valable pour le courant continu et le courant alternatif; d'autres ont deux graduations, une pour chaque nature de courant.

I. AMPÈREMÈTRES

I. Ampèremètres thermiques.

Un fil métallique fin (0,2 *mm*), d'un alliage platine-argent ou de bronze spécial, AB (fig. 1) est traversé par la totalité ou une fraction connue du courant à mesurer. Un fil de laiton fixé entre les points C et D est tiré par un fil de soie passant sur une poulie *p* et tendu par un ressort *r*.

Le courant échauffe le fil AB qui s'allonge. Le point C vient en C′, le point E en E′, et *r* en *r*′. La poulie tourne entraînant une aiguille et l'allongement du fil est repéré, très amplifié, sur un cadran.

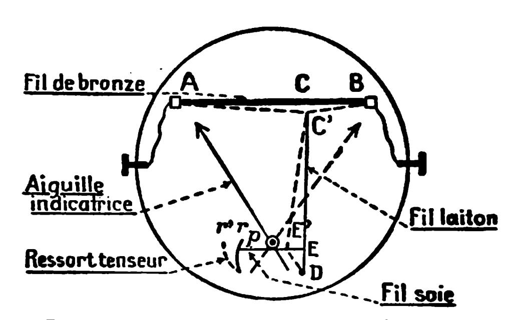


Fig. 1. — Schéma d'un ampèremètre thermique.

L'appareil est *apériodique*. Il est gradué avec du courant continu.

1. Les appareils de mesure pour courant continu ont été étudiés dans les 47e et 48e leçons.

Traversé par un courant alternatif, il en mesure l'intensité **efficace**, par définition même de cette grandeur électrique.

Les ampèremètres thermiques des différents constructeurs diffèrent par les moyens employés pour *amplifier* l'allongement du fil chaud et par le dispositif de *compensation* des variations de la température extérieure auxquelles les appareils doivent être insensibles.

Ces instruments ont le défaut d'être *fragiles* et *peu fidèles*, car les changements importants et nombreux de la température du fil AB en modifient la structure et les propriétés.

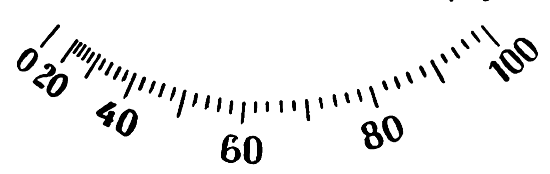


Fig. 2. — Les divisions de la graduation d'un ampèremètre thermique sont resserrées vers le zéro. La *sensibilité* de l'appareil est très faible pour les petites intensités.

Surtout, ils sont *peu sensibles :* les meilleurs modèles exigent de 0,64 à 1,14 watts pour dévier de toute leur échelle, soit de 0,5 à 2,5 ampères.

L'action calorifique du courant étant proportionnelle au carré de l'intensité, la graduation de l'échelle est très resserrée vers le zéro (fig. 2), les lectures ne sont possibles qu'à partir du cinquième du maximum. *Les ampèremètres thermiques ne conviennent pas pour la mesure des faibles intensités.*

2. Ampèremètres électrodynamiques.

Une *bobine de champ*, divisée en deux parties (fig. 3), agit sur un *cadre* mobile rappelé par deux ressorts spiraux. La bobine et le cadre sont parcourus par des fractions déterminées du courant à mesurer : le moment du couple qui dévie le cadre est donc proportionnel au carré de l'intensité du courant étudié.

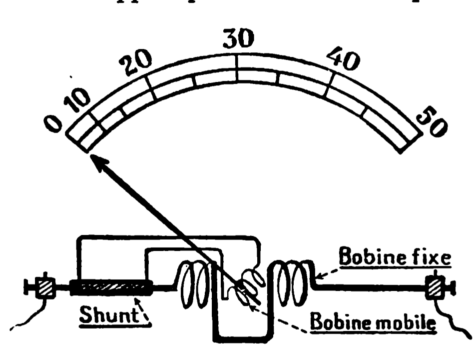


Fig. 3. — Schéma d'un ampèremètre électrodynamique.

Les oscillations de l'équipage mobile sont amorties par une palette très légère fixée à l'aiguille; cette palette se déplace avec un jeu très faible dans une boîte presque complètement fermée; la résistance de l'air freine le mouvement (fig. 7).

L'appareil fonctionne avec du courant alternatif comme avec du courant continu. Les bobines fixe et mobile n'ont pas de noyaux de fer; leur self-induction est faible et la même graduation de l'instrument sert pour le courant continu

et les courants alternatifs de fréquence industrielle. L'échelle est resserrée à l'origine et n'est lisible qu'à partir du cinquième de la graduation totale.

Les ampèremètres électrodynamiques ne peuvent donc servir à la mesure des très faibles intensités. Ils sont influencés par les champs magnétiques extérieurs.

Deux sensibilités, du simple au double, sont obtenues en couplant les deux moitiés de la bobine fixe en série ou en parallèle (fig. 4).

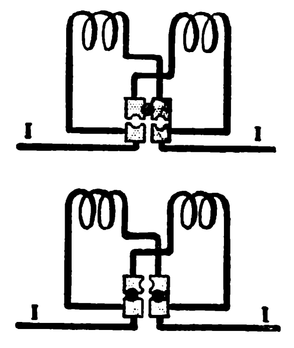


Fig. 4. — En haut les bobines sont couplées en série. En bas, elles sont couplées en parallèle.

3. Ampèremètres ferromagnétiques ou à fer doux.

Une *bobine fixe* cylindrique A, parcourue par le courant à mesurer, est munie, à l'intérieur, suivant une génératrice, d'une *palette fixe en fer doux* F (fig. 5). Une aiguille montée sur pivots, rappelée par deux ressorts spiraux, et possédant un amortisseur à air, porte une *palette de fer doux* F', voisine de la palette F.

Dans le champ magnétique produit à l'intérieur de la bobine par le courant à mesurer, les deux palettes s'aimantent de la même façon et se repoussent. ***La force de répulsion est fonction du carré de l'intensité*** du courant; elle est équilibrée, quand l'aiguille s'arrête, par la force résultant de la torsion des spiraux. L'appareil fonctionne sous l'action d'un courant alternatif comme sous l'action d'un courant continu.

Fig. 5. — Schéma d'un ampèremètre à fer doux. La bobine A est coupée horizontalement. L'amortisseur n'est pas représenté.

A cause de l'hystérésis du fer doux, l'induction des palettes est en retard sur l'intensité du courant qui la produit. Il en résulte qu'en général un *ampèremètre ferromagnétique doit être gradué spécialement pour la fréquence du courant auquel il est destiné.*

Les ampèremètres à fer doux sont robustes. Ils sont très employés. Signalons qu'il en est de construction si médiocre qu'ils sont seulement des indicateurs de courant et non des appareils de mesure.

4. Ampèremètres à aimant et cadre mobile.

Les ampèremètres thermiques, électrodynamiques et électromagnétiques conviennent peu pour la mesure des faibles intensités.

Les appareils à aimant et cadre mobile sont bien plus sensibles, mais ils sont polarisés. Depuis quelques années on les emploie à mesurer les courants alternatifs que l'on redresse au préalable avec un *redresseur à oxyde de cuivre.*

L'élément essentiel d'un tel redresseur est une rondelle de cuivre rouge sur l'*une* des faces de laquelle on a formé de l'oxyde cuivreux Cu^2O. Cette rondelle est peu résistante pour un courant qui passe dans le sens oxyde→ cuivre, elle est très résistante pour un courant de sens opposé.

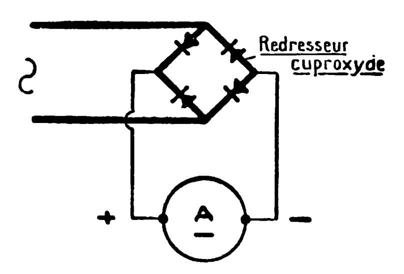


Fig. 6. — Montage d'un ampèremètre à cadre mobile et aimant dans un circuit à courant alternatif.

On superpose un nombre de ces rondelles variable suivant la tension du courant à redresser. L'appareil placé dans un circuit à courant alternatif laisse passer une alternance du courant et arrête l'autre. Plutôt qu'un redresseur, c'est une soupape qui ne fonctionne que dans un sens.

Pour utiliser aussi l'autre alternance, on réalise un montage analogue à celui du pont de Wheatstone avec quatre redresseurs (fig. 6). On vérifiera sur la figure que le courant qui passe dans la diagonale du pont, laquelle comporte l'ampèremètre A, a toujours le même sens.

Ce courant fait dévier un ampèremètre à cadre mobile pour courant continu. Il est nécessaire de graduer spécialement l'appareil destiné à du courant alternatif en l'accompagnant de son redresseur.

On fabrique ainsi des milliampèremètres qui donnent une déviation de toute leur échelle graduée pour 10 milliampères efficaces.

5. Shunts et transformateurs d'intensité.

Avec des ampèremètres thermiques ou à cadre mobile avec redresseur, pour mesurer de grandes intensités efficaces, on emploie des *shunts* analogues à ceux qui servent pour le courant continu.

Les bobines des appareils électrodynamiques et électromagnétiques possèdent de la self, faible, mais dont l'effet, appréciable dans une dérivation aux bornes d'un shunt, dépend de la forme et de la fréquence du courant. Aussi, pour mesurer de grandes intensités alternatives avec des ampèremètres électrodynamiques et électro-magnétiques se sert-on,

au lieu de shunts, de ***transformateurs d'intensité.*** Le courant à mesurer traverse le primaire du transformateur; le secondaire, branché aux bornes de l'ampèremètre, y produit une intensité qui est, suivant le transformateur, le dixième, le centième ou le millième de celle du courant à mesurer.

II. VOLTMÈTRES

6. Voltmètres pour tensions alternatives.

Nous savons qu'un voltmètre est un ampèremètre sensible auquel est ajoutée en série une grande résistance (fig. 7).

Pour la mesure des tensions alternatives, on construit des voltmètres thermiques, électrodynamiques, électromagnétiques et des voltmètres à cadre mobile et aimant avec redresseur cuproxyde. Les remarques faites à propos des divers types d'ampèremètres valent aussi pour les voltmètres.

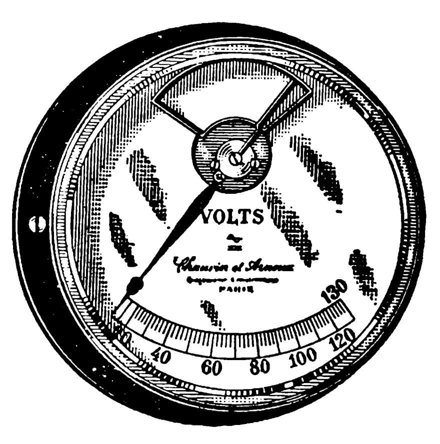


Fig. 7. — Voltmètre électromagnétique. Remarquer l'amortisseur à air : les parois de la boîte, la palette mobile fixe à l'aiguille.

Pour mesurer les tensions alternatives de plusieurs milliers de volts qui sont d'usage fréquent, on se sert de ***transformateurs de tensions.*** Le primaire est branché sur la tension à mesurer, le secondaire sur un voltmètre ordinaire pour 150 volts. La tension primaire est 20, 100, 1 000 fois..., la tension secondaire suivant le transformateur employé

III. WATTMÈTRES

7. Wattmètres électrodynamiques.

En général, un ampèremètre et un voltmètre ne suffisent pas pour mesurer la puissance absorbée par un récepteur à courant alternatif. On emploie un wattmètre.

Un wattmètre électrodynamique comporte une bobine fixe et une bobine mobile (fig. 8).

La bobine fixe A, faite d'un conducteur de grosse section, est mise en série avec le récepteur : c'est la *bobine d'intensité*.

Un cadre de fil fin B, qui est la *bobine de tension*, est mobile à l'intérieur de la bobine précédente; il est monté sur deux pivots, rappelé par deux ressorts spiraux et muni d'un amortisseur à air. Ce cadre mobile, avec une résistance importante en série, est placé *en dérivation* aux bornes du récepteur. Une aiguille fixée sur la bobine mobile se meut sur un cadran.

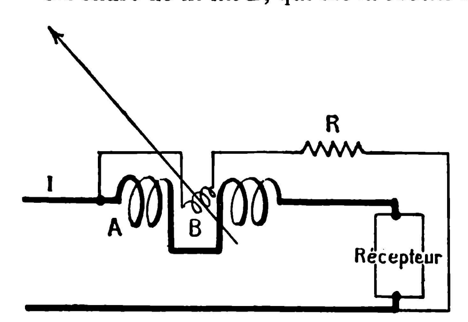


Fig. 8. — Schéma d'un wattmètre électrodynamique.
A, bobine d'*intensité*, est fixe.
B, bobine de *tension*, est mobile.

Lorsque l'appareil est employé avec du *courant continu*, dans la bobine fixe l'intensité est I, et, dans la bobine mobile $\frac{U}{R}$; le couple moteur du cadre est donc fonction de UI, c'est-à-dire de la puissance P dépensée dans le récepteur. Ce couple fait dévier la bobine mobile jusqu'à ce qu'il soit équi-

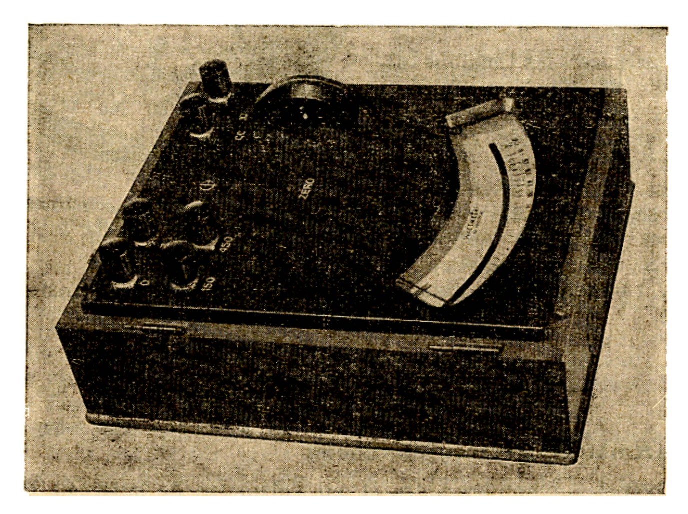


Fig. 9. — Wattmètre électrodynamique de contrôle. — Remarquer le commutateur de couplage des bobines d'intensité et les trois bornes pour trois sensibilités de tension (150, 300, 450 V).

libré par la tension des spiraux. A chaque valeur de P correspond donc une position de l'aiguille.

Si l'on emploie le wattmètre dans un circuit à ***courant alternatif***, à chaque instant le couple agissant sur le cadre mobile est proportionnel à la *puissance instantanée ui*. Quand la fréquence est assez grande (plus de 15), l'aiguille n'oscille pas et prend une position moyenne correspondant à la ***puissance moyenne*** du récepteur, que nous appellerons simplement ***puissance*** du récepteur.

La bobine fixe est constituée par deux cadres faits d'une bande mince de cuivre formant plusieurs dizaines de spires. Ces deux cadres, placés l'un à côté de l'autre, peuvent être couplés en série ou en parallèle, l'on obtient ainsi deux sensibilités d'intensité.

Pour que les déviations de l'aiguille soient proportionnelles aux puissances, les bobines fixe ou mobile, au lieu d'être planes, ont une forme spéciale qui modifie la direction de leur champ magnétique.

La bobine mobile est munie d'un amortisseur à air.

Dans les wattmètres pour tableaux, on augmente le flux dans les bobines, et par conséquent le couple déviant, par un circuit magnétique en fer feuilleté composé d'un noyau cylindrique dans la bobine mobile et d'une carcasse enveloppant les bobines fixes.

Des prises sur la résistance en série avec la bobine mobile fournissent aussi plusieurs sensibilités de tension.

Si l'intensité ou la tension sont très grandes, on utilise avec l'appareil des transformateurs d'intensité ou de tension.

REMARQUE. — On construit des *wattmètres thermiques* qui sont peu employés et des *wattmètres dits à induction* très robustes, mais peu précis.

Comme on emploie aussi des ampèremètres, des voltmètres et surtout des compteurs à induction, nous indiquerons le principe commun à tous ces appareils après avoir étudié les champs tournants.

8. Précision des mesures électriques.

a) Soit à mesurer une grandeur G. Supposons que sa valeur ***exacte***, exprimée en unités convenables, soit n. Si l'appareil employé à la mesure ne permet pas de distinguer les unes des autres des grandeurs dont la valeur est comprise entre n et $n + e$, ou entre $n - e$ et n, on dit que ***erreur absolue*** possible sur la mesure, du fait de l'instrument employé, est $\pm e$, *ou simplement e*.

L'***erreur relative*** possible est $\frac{e}{n}$. Comme $\frac{e}{n}$ est petit, 0,02 par exemple, on dit que l'***erreur relative*** est 2 %.

Plus l'erreur relative possible est petite, plus l'appareil est *précis*. Dire d'un appareil que sa précision atteint 1 %, c'est dire que l'erreur relative possible est de 0,01, ou encore que l'erreur absolue peut atteindre 1 % de la grandeur mesurée.

Par exemple, si, en mesurant une puissance P avec un wattmètre dont la précision est 1 %, on a lu 736 watts, on peut affirmer que la valeur de P est comprise entre 729 et 743 watts.

b) Suivant leur précision, les appareils de mesure électriques se classent dans les catégories suivantes :

CLASSE DE L'APPAREIL	LIMITE DE L'ERREUR ÉVALUÉE EN POUR-CENT DU MAXIMUM DE L'ÉTENDUE DE MESURE	DÉSIGNATION COURANTE DE L'APPAREIL
0,2	± 0,2	Appareil étalon.
0,5	± 0,5	Appareil de contrôle.
1,0	± 1,0	Appareil de tableau.
1,5	± 1,5	id.
2,5	± 2,5	Indicateur.

Ainsi l'erreur absolue possible du fait de l'instrument quand on effectue une mesure avec un voltmètre de 150 *volts*, classe 0,5, est ± 0,75 *volt*.

La classe est, en général, indiquée sur le cadran de l'instrument.

Suivant l'usage auquel ils sont destinés, les appareils se répartissent en :

1° *Appareils étalons*. Ces étalons servent surtout à la vérification des autres instruments. Ils sont de la classe 0,2. On ne les emploie qu'avec beaucoup de précautions et on les transporte le moins possible.

2° *Appareils de contrôle*. Ce sont les appareils transportables qui sont employés pour les essais industriels. Ils sont de la classe 0,5.

3° *Appareils de tableau*. Ces appareils fixes et parfois de grandes dimensions, appartiennent à classe 1,0 ou 1,5.

4° *Appareils ordinaires*. Leur qualité essentielle est d'être peu coûteux.

c) En somme, les appareils de mesure électriques sont beaucoup moins précis que les bonnes balances ou même que les palmers et les pieds à coulisse soignés. Quand une mesure est faite avec des appareils de contrôle de bonne fabrication et en bon état, les deux premiers chiffres significatifs du nombre obtenu sont exacts, le suivant est incertain.

Il est donc inutile :

1° d'écrire ce nombre avec plus de trois chiffres significatifs;

2° de conserver, dans les opérations effectuées avec de tels nombres, plus de chiffres significatifs qu'il n'en faut pour une approximation finale de + 1 %.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Constitution d'un wattmètre de tableau. — La figure 10 est le croquis des bobines fixes et mobile avec leur circuit magnétique d'un wattmètre pour tableau de distribution.

La bobine mobile est un cadre de fil fin. Son noyau magnétique cylindrique est formé d'un empilement de disques de tôle mince.

L'enroulement gros fil comprend deux bobines couplées en série ou en parallèle, placées de part et d'autre de l'axe du cadre mobile. Chaque bobine consiste en deux côtés rectilignes et deux bases repliées à angle droit qui ont la forme d'une

demi-circonférence. Les côtés droits sont logés dans une rainure de la carcasse magnétique en fer feuilleté.

Cette carcasse est alésée concentriquement au noyau. Le cadre mobile tourne dans l'entrefer existant entre les deux pièces. Dans la région de l'entrefer où le

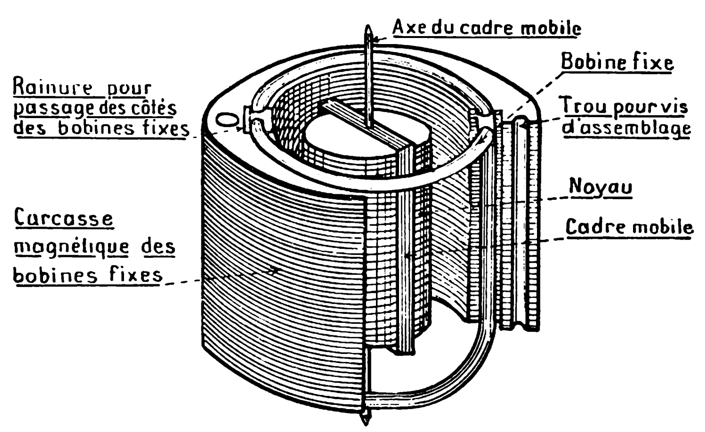


Fig. 10. — Croquis simplifié d'un élément wattmétrique avec coupe montrant le cadre mobile et son noyau cylindrique feuilleté.
Remarquer la forme les bobines fixes.

cadre se déplace, le champ est sensiblement uniforme et radial. Il en résulte que le déplacement angulaire du cadre est proportionnel à la puissance mesurée.

Un tel wattmètre est dit *ferro-dynamique :* c'est un appareil électro-dynamique avec circuit magnétique en fer.

Exercices.

1. Pourquoi l'hystérésis joue-t-elle un rôle dans le fonctionnement d'un appareil à fer doux?

2. La bobine de tension d'un wattmètre se branche suivant l'un ou l'autre des schémas de la figure 11.

La tension aux bornes du récepteur est U, l'intensité qu'il absorbe I, la résistance de la bobine fixe *r*, celle de la bobine mobile avec sa résistance additionnelle R.

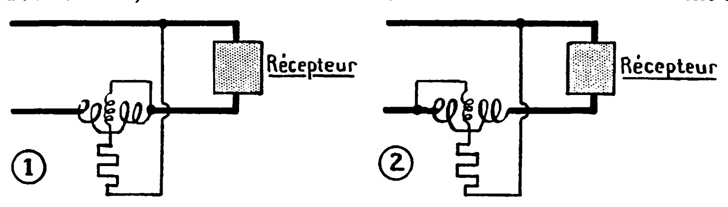


Fig. 11. — Montage d'un wattmètre.
1. montage *aval*. 2. montage *amont*.

1° Calculer la puissance indiquée par le wattmètre dans le cas du montage *amont* et dans le cas du montage *aval*.

2° Quand U = 110 *V*, I = 10 *A*, *r* = 0,02 Ω, R = 6 000 Ω, quel est le montage qui donne la moindre erreur? (Il s'agit de mesurer P = UI.)

3. La résistance d'un voltmètre thermique de calibre 150 *V* est 750 Ω. Quelle intensité et quelle puissance absorbe l'instrument lors de sa déviation totale?

4. Un ampèremètre thermique employé sans shunt dévie de toute son échelle pour 2,5 A. Le shunt de 100 A de l'appareil a une résistance de 3 077 microhms.

Quelle est la tension aux bornes du shunt quand l'ampèremètre mesure 100 ampères?

Quelle est la résistance propre de l'ampèremètre?

5. Expliquer pourquoi un ampèremètre électrodynamique gradué pour du courant continu mesure l'intensité d'un courant alternatif qui le traverse. — (Il faut montrer que le couple qui s'exerce entre les deux cadres est fonction du carré de l'intensité.)

Même question pour un ampèremètre électromagnétique dans lequel l'hystérésis est négligeable.

6. La résistance d'un voltmètre de 150 *volts* est 30 000 *ohms*. Quelle résistance additionnelle faut-il mettre en série avec l'appareil pour porter son calibre à 600 *volts*?

7. Un wattmètre de la classe 0,5 est établi pour deux sensibilités (ou calibres) d'intensité, soit 5 et 10 *A* et trois sensibilités (ou calibres) de tension, soit 75, 150, 300 *V*. L'échelle possède 150 divisions. Faire le tableau des différentes constantes de l'appareil, c'est-à-dire des valeurs en watts d'une division de l'échelle, pour les diverses combinaisons de sensibilités d'intensité et de tension. Indiquer, pour chaque constante, la limite de l'erreur absolue possible dans les mesures correspondantes.

8. Dans un voltmètre thermique 0-130 *V*, le fil de mesure en platine-argent de 0,05 *mm* a une résistance de 25 Ω; sont en série avec ce fil un fusible de 8 Ω et une résistance additionnelle en manganine. A la déviation maximum le voltmètre absorbe 0,15 A.

Quelle est l'énergie perdue en une heure dans chacune des parties de l'appareil et quelle est la puissance totale absorbée quand le voltmètre indique une tension de 115 *V*?

15. CIRCUIT PARCOURU PAR UN COURANT ALTERNATIF

58e LEÇON

Résistance, Inductance et Capacité d'un conducteur.

Quand on applique une *tension continue* aux extrémités d'un conducteur, l'*intensité du courant continu* qui en résulte est fonction de la *résistance* du conducteur.

Quand la *tension appliquée est alternative*, le courant qu'elle produit est alternatif; et, parce qu'il est *constamment variable*, la *self-induction* et la *capacité* du conducteur interviennent, avec la *résistance*, pour déterminer le régime du courant qui s'établit.

Rappelons l'essentiel de ce que nous avons étudié antérieurement sur ces trois propriétés des conducteurs.

I. Résistance électrique.

C'est la propriété d'un conducteur de transformer de l'énergie électrique en chaleur.

On évalue cette résistance en *ohms : l'ohm est la résistance* d'un conducteur dans lequel un courant de 1 *ampère* dépense, sous forme de chaleur, une puissance de 1 *watt*.

On calcule la résistance d'un conducteur homogène de section constante par la formule d'Ohm :

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

La transformation d'énergie électrique en chaleur dans un conducteur a pour conséquences :

1° de réduire, pour une tension donnée aux bornes, l'intensité du courant qui passe dans le conducteur :

$$I = \frac{U}{R};$$

2° de produire une chute de tension le long des conducteurs.

2. Auto-induction d'un circuit.

Un circuit possède la propriété de produire en lui-même une f. é. m. induite quand il est parcouru par un courant variable : on donne à ce phénomène le nom d'*auto-induction* ou de *self-induction.*

La f. é. m. d'auto-induction s'oppose aux variations du courant.

Elle est proportionnelle à la variation Δi de l'intensité et inversement proportionnelle à la durée Δt de cette variation :

$$e = - L\frac{\Delta i}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Le coefficient de proportionnalité L se nomme *coefficient d'auto-induction* ou ***inductance*** du circuit.

Le signe — qui le précède (L un nombre toujours positif), indique que la f. é. m. induite s'oppose à sa cause, qui est la variation de l'intensité du courant.

L'unité d'inductance est le ***henry*** (H) : c'est, d'après la formule (1), l'inductance d'un circuit dans lequel une f. é. m. de 1 *volt* est produite lorsque le courant électrique qui parcourt le circuit varie uniformément de 1 *ampère* pendant chaque 1 *seconde.*

On sait calculer l'inductance d'un circuit. On trouve :

1° pour une bobine en anneau sans noyau de fer, ayant N spires, une longueur moyenne de *l mètres* et une section de S m^2 :

$$L = 1{,}25 \frac{N^2S}{l} 10^{-6} \text{ henrys.}$$

2° pour une bobine en anneau emplie d'un noyau de fer, en supposant le fer non saturé ($B < 1$ W*b*/*m*²), c'est-à-dire la perméabilité μ constante :

$$L = 1{,}25\, \mu \frac{N^2S}{l} 10^{-6} \text{ henrys.}$$

Ces formules sont applicables, en première approximation, à une bobine très longue devant ses dimensions transversales.

Dans tous les autres cas, retenons que, *pour des bobines de même longueur et de même section, les inductances sont proportionnelles aux carrés des nombres de spires.*

Un conducteur rectiligne possède une inductance très faible.

L'inductance d'une ligne faite de deux conducteurs parallèles est proportionnelle à la longueur de la ligne; elle dépend du diamètre des fils et de

leur distance : elle croît si la section des conducteurs est faible et si leur distance est grande. Par exemple, une ligne faite de deux câbles de cuivre de 10 *mm* de diamètre a, *par kilomètre*, une inductance de 0,832 *millihenry*, si les conducteurs sont distants de 25 *cm;* 0,971 *millihenry* s'ils sont distants de 50 *cm;* 1,111 *millihenry* s'ils sont distants de 100 *cm*.

3. Rôle de l'auto-induction en courant alternatif.

Quand il s'agit de courant continu, l'auto-induction d'un circuit est en général de peu d'importance parce qu'elle n'intervient que pendant les très courtes dureés d'établissement et de suppression du courant.

Dans un circuit où le courant est alternatif, ce rôle est au contraire très grand : l'expérience suivante le montre.

Expériences. — Une bobine de plusieurs centaines de spires d'un fil assez gros possède un noyau de fer feuilleté AB faisant partie d'un

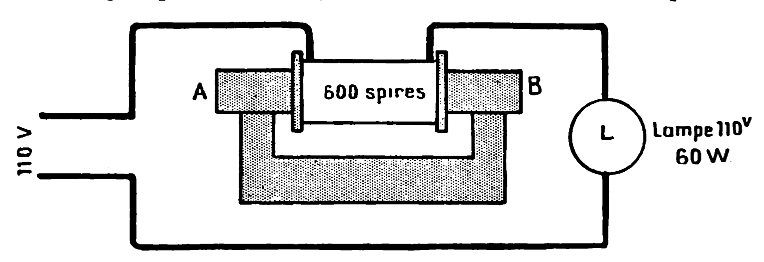


Fig. 1. — Bobine à noyau mobile en série avec une lampe.
La lampe s'allume si la *tension de* 110 *volts est continue*.
Le filament rougit à peine si la *tension de* 110 *volts est alternative*.

circuit magnétique fermé. Le noyau peut se retirer de la bobine. En série avec l'appareil, plaçons une lampe à 110 volts (fig. 1).

1° Alimentons le circuit par du *courant continu* à 110 volts : la lampe brille de son éclat normal.

2° Alimentons le circuit par du *courant alternatif* à 110 volts de fréquence 50 Hz : le filament de la lampe rougit à peine.

Retirons graduellement le noyau de la bobine : l'éclat de la lampe augmente parce que l'inductance de la bobine diminue.

4. Capacité.

Deux plaques conductrices séparées l'une de l'autre par un isolant constituent un *condensateur*.

Quand la tension entre les armatures est V *volts*, la charge d'un condensateur est Q *coulombs* :

$$Q = CV.$$

Le facteur C, caractéristique de l'appareil, se nomme sa *capacité*.

L'unité de capacité est le ***farad*** ***(F)*** **: c'est la capacité d'un condensateur qui, pour une tension de 1 *volt* entre ses armatures, prend une charge de 1 *coulomb*.**

Le farad est une capacité très grande, aussi utilise-t-on plutôt le millionième de farad ou *microfarad* (μ *F*). Mais, *dans toutes les formules, la capacité doit être évaluée en farads.*

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface des armatures, inversement proportionnelle à leur distance et dépend de la nature du diélectrique qui les sépare (52e Leçon).

5. Expériences montrant le rôle d'une capacité en courant alternatif.

Expériences. — Montons en série une lampe de 60 watts, 110 volts, et un condensateur de 20 microfarads (fig. 2).

1° Appliquons aux bornes de l'ensemble une *tension continue de* 110 *volts : la lampe ne s'allume pas.*

Un condensateur fait coupure dans un circuit à courant continu.

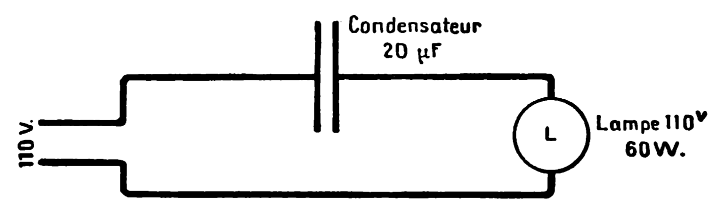


Fig. 2 — **Condensateur en série avec une lampe.**
La lampe reste éteinte si la tension de 110 volts est continue.
La lampe brille de son éclat normal si la tension de 110 volts est alternative.

2° Appliquons aux bornes de l'ensemble *une tension alternative de* 110 *volts, fréquence* 50 Hz : *la lampe brille de son éclat normal.*

Un condensateur se laisse donc traverser par du courant alternatif.

6. Les circuits usuels peuvent réunir à la fois résistances, inductances et capacités.

Les lampes à incandescence sont des récepteurs seulement résistants.

Les transformateurs, les moteurs comportent des bobines à noyaux de fer; ils possèdent à la fois résistance et inductance. Les tubes au néon aussi sont résistants et inductifs.

Des condensateurs sont mis quelquefois dans les circuits pour compenser l'influence des bobines.

Nous étudierons d'abord les cas où le circuit est une résistance pure, ou une inductance pure, ou une capacité pure, et ensuite les circuits qui présentent à la fois résistance, inductance et capacité.

Exercices.

1. Dans les montages d'appareils de mesures avec du courant alternatif, il convient :

1° de ne pas « boudiner » les conducteurs,

2° de torsader ensemble les fils d'arrivée et de départ du courant.

Justifier ces prescriptions.

2. Dans les installations électriques sous tubes métalliques, on ne place jamais un seul conducteur à courant alternatif dans un tube, mais toujours le conducteur d'aller et le conducteur de retour du même courant dans le même tube.

Pourquoi?

3. En s'aidant des formules qui donnent la valeur approximative de l'inductance d'une bobine, chercher les moyens de réaliser une bobine d'inductance réglable :

1° variant de façon discontinue,

2° variant de façon continue.

4. Un étalon d'inductance est constitué par un disque circulaire en bois dont la jante est creusée d'une gorge rectangulaire emplie complètement par l'enroulement. Cet enroulement a un diamètre intérieur de 48 *mm*; il est fait d'un fil de cuivre de 0,5 *mm* émaillé sous coton, 15 spires jointives couvrent une longueur de 1 *cm*. La bobine porte 75 couches de chacune 54 spires, son coefficient de self-induction est 1 *henry*.

1° Calculer les dimensions de la gorge. Quelle est la longueur d'une spire moyenne? Déterminer la longueur totale du fil enroulé et sa résistance, sachant que la résistance d'un kilomètre de fil de 0,5 *mm* est 87 *ohms*.

2° Sur une carcasse identique, on enroule du fil de 1 *mm* isolé par deux couches de coton qui portent le diamètre du conducteur à 1,33 *mm*. Les dimensions d'encombrement de l'enroulement sont les mêmes, à une fraction de millimètre près, que pour la bobine de 1 *henry*. Quelles sont la résistance et l'inductance de la bobine obtenue?

5. Une bobine cylindrique a un diamètre de 6 *cm* et une longueur bobinée de 30 *cm*. L'enroulement comprend une seule couche de 450 spires jointives.

1° Quel est approximativement, en microhenrys, le coefficient d'inductance de la bobine?

2° Des prises sont faites à la 225e et à la 300e spire. Quelles sont les valeurs correspondantes de l'inductance?

Relation entre l'intensité du courant et la tension alternative aux bornes d'un circuit[1] simplement résistant.

Soient U la tension efficace aux bornes du circuit de résistance R (sans self ni capacité), I l'intensité efficace du courant.

1. On démontre[2] par le calcul que :

1° ***tension efficace U, intensité efficace I et résistance R, sont liées par la relation***

$$I = \frac{U}{R}.$$

Comme dans le cas du courant continu, I est évalué en ***ampères,*** U en *volts* et R en *ohms*;

2° ***la puissance dépensée dans le circuit*** est :

$$\underset{watts}{P} = \underset{volts}{U}\ \underset{ampères}{I} = \underset{ohms}{R}\ \underset{ampères}{I^2};$$

3° ***l'intensité et la tension sont en phase.***

2. Vérifions ces résultats.

a) ***Valeur de l'intensité.***

Comme résistance pratiquement sans self ni capacité, employons un fil de nickel-chrome de 10/10 de 8 à 10 mètres de longueur replié en une longue boucle dont les deux brins ne se touchent pas (fig. 1).

En dérivation aux bornes de la résistance R, montons un voltmètre V; en série avec elle, un ampèremètre A et un rhéostat (fig. 2).

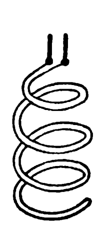


Fig. 1. — Un fil ainsi enroulé ne possède pas de self-induction. Dites pourquoi.

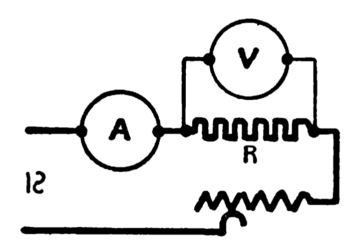


Fig. 2. — Mesure de la tension et de l'intensité dans la résistance sans self-induction R.

1. Dans tout ce qui suit, et pour simplifier, nous écrirons *circuit* pour *portion de circuit*.
2. Voir la note complémentaire, page 374.

1° En utilisant diverses tensions continues, U_1, U_2, U_3 .... mesurons les intensités correspondantes : I_1, I_2, I_3. Nous obtenons :

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_3}{I_3} = R$$

2° En employant une tension alternative de fréquence 50, nous constatons que l'intensité I correspondante satisfait à la relation :

$$I = \frac{U}{R}$$

quelle que soit la valeur de la tension U.

3° Changeons la fréquence de la tension alternative. Avec une tension à la fréquence 15 Hz, nous obtenons le même résultat.

***b*) Valeur de la puissance.**

Nous pouvons utiliser la résistance qui vient de nous servir ou employer un rhéostat de lampes.

Plaçons dans le circuit, outre l'ampèremètre et le voltmètre, un wattmètre (fig. 3).

Plusieurs séries de mesures de U, de I et de P, pour des fréquences de 50, 15 ou 100 Hz, montrent, avec l'approximation donnée par les appareils de mesure employés, que



$$P = UI.$$

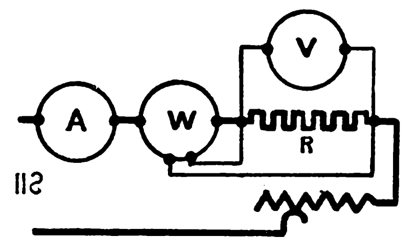


Fig. 3. — Mesure de la puissance dépensée dans la résistance non inductive R.

***c*) Concordance de phase de l'intensité et de la tension.**

Employons un oscillographe double de démonstration.

L'un des fils oscillants O, shunté s'il est nécessaire, est monté en série

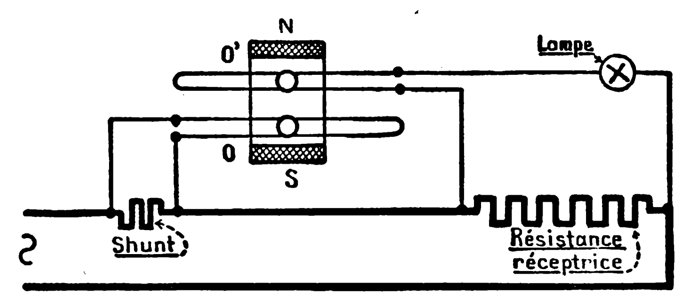


Fig. 4. — Montage de l'oscillographe double pour obtenir à la fois la courbe de l'intensité (oscillographe O) et celle de la tension entre les bornes de la résistance réceptrice (oscillographe O').

avec la résistance réceptrice; l'autre O' est placé en dérivation comme un voltmètre (fig. 4).

Nous obtenons les courbes de la figure 5; elles sont en concordance de phase.

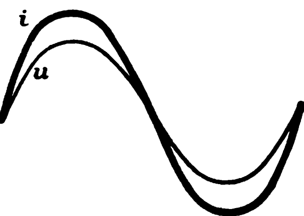


Fig. 5. — Courbes obtenues à l'oscillographe : elles sont en phase,
***i*, courbe de l'intensité dans le circuit.**
***u*, courbe de la tension aux bornes de la résistance réceptrice.**

3. La résistance d'un conducteur est la même pour du courant alternatif que pour du courant continu.

Nous venons de voir que les relations

$$U = RI$$
$$P = UI = RI^2$$

dans le cas d'une *résistance pure* s'appliquent aux tensions efficaces et aux intensités efficaces dans un circuit à courant alternatif, comme elles s'appliquent aux tensions et intensités continues.

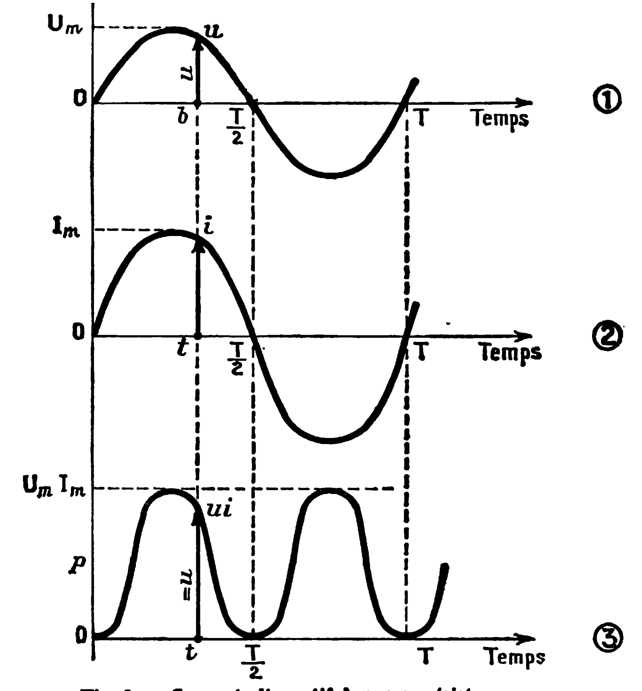


Fig. 6. — Courant alternatif dans une *résistance pure*.
(1) Courbe de la *tension*,
(2) Courbe de l'*intensité*.
(3) Courbe de la *puissance instantanée* : c'est aussi une *sinusoïde*.

En d'autres termes, ***la résistance d'un conducteur donné est la même pour du courant alternatif et pour du courant continu.***

Précisons en faisant remarquer qu'*il n'en est ainsi que pour les fréquences basses et moyennes* (jusqu'à 1 000 hertz).

Dans le cas de hautes fréquences, on a constaté que la propagation du courant se fait surtout au voisinage de la surface du conducteur. On donne à ce phénomène, dû à la self-induction, le nom de *skin-effect*[1]. La résistance du conducteur est alors plus grande que pour du courant continu.

4. La puissance instantanée dépensée dans une résistance par un courant alternatif est pulsatoire.

Puisque la tension et l'intensité sont en phase, à l'instant t leurs valeurs sont :

$$u = U_m \sin \omega t$$
$$i = I_m \sin \omega t.$$

Traçons l'une au-dessous de l'autre les courbes de u (courbe 1, fig. 6) et de i (courbe 2).

Sur une troisième courbe, figurons les produits $u\ i$ des ordonnées des courbes précédentes; c'est la courbe de la *puissance instantanée* en fonction du temps, c'est-à-dire la courbe qui donne la valeur de la *puissance à chaque instant.*

Nous voyons que la puissance instantanée varie entre O et $U_m I_m$; elle est *pulsatoire*; sa période est $\frac{T}{2}$, moitié de la période T, et par suite sa fréquence est double de celle du courant : soit 100 pour le courant usuel de fréquence 50. Cette pulsation n'est pas sensible dans les récepteurs calorifiques ordinaires dont l'inertie calorifique fait volant.

5. Représentation vectorielle de la tension et de l'intensité dans un circuit simplement résistant.

Dans le mode de représentation de Fresnel, deux vecteurs ayant même origine, même direction, même sens, représenteront, à une certaine échelle, tension et intensité (fig. 7).



Fig. 7. — Représentation vectorielle de la tension et de l'intensité en phase.

6. Le courant alternatif s'emploie comme le courant continu dans les appareils de chauffage électrique et d'éclairage par incandescence.

Dans les appareils de chauffage où la chaleur est produite par effet Joule (radiateurs, fers à repasser, fourneaux, fers à souder, etc.), on emploie indifféremment du courant alternatif ou du courant continu.

Il n'y a pas non plus de différence de construction entre les lampes

1. Le mot anglais *skin* signifie *peau.*

à incandescence pour l'une ou l'autre sorte de courant. Pour que les lampes ne « papillotent » pas, la fréquence ne doit pas être trop basse; à la fréquence 25 Hz, qui est parfois employée, le fonctionnement des lampes est encore satisfaisant.

Dans les conducteurs de courant alternatif, il se produit, comme dans ceux de courant continu, une perte de puissance par dégagement de chaleur Joule.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

1. La tension appliquée entre les bornes de la résistance R est :

$$u = U_m \sin \omega t.$$

L'*intensité instantanée* et la *tension instantanée* obéissent à la loi d'Ohm

$$i = \frac{u}{R}.$$

Donc,

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t,$$

ce qui montre que :

1° — L'intensité maximum I_m du courant alternatif est $I_m = \frac{U_m}{R}$ et par suite :

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m : \sqrt{2}}{R} \quad \text{ou} \quad I = \frac{U}{R}$$

2° — L'intensité est en phase avec la tension.

3° — Toute la puissance P fournie est transformée en chaleur, puisque nous avons affaire à une *résistance pure*. Or, la chaleur dégagée dans une résistance R par un courant d'intensité efficace I est RI^2. Donc :

$$P = RI^2 = RI \times I = UI.$$

Exercices.

1. Les deux résistances chauffantes d'un pot à colle de menuisier se composent chacune d'un fil de 5 *m* de long, 0,2 *mm* de diamètre dont la résistivité est 100 micrhoms-centimètre.

L'ustensile est branché sur une tension alternative de 110 volts de fréquence 50 Hz. On dispose de trois allures de chauffe :

1° les deux résistances sont en parallèle;

2° une seule résistance est en circuit;

3° les deux résistances sont en série.

Calculer :

1° la valeur de l'une des résistances;

2° l'intensité absorbée pour chaque allure de chauffe;

3° le nombre de calories dégagées par seconde quand les résistances sont en parallèle;

4° le temps nécessaire pour porter un litre d'eau de 15 °C à 95 °C en supposant que la moitié de la chaleur produite soit perdue;

5° le coût de cette opération quand le *kWh* est payé 0,3 NF.

2. Une installation d'éclairage comprend 50 lampes de 100 watts, 110 volts. Elle est alimentée par une ligne à deux fils dont la longueur, comptée depuis la génératrice jusqu'aux lampes, est de 100 mètres.

Cette ligne est faite d'un fil de cuivre dont la section est de 10 mm^2 et la résistivité 2 microhms-centimètres. Calculer :

1° l'intensité absorbée par les lampes;

2° la résistance de la ligne;

3° la chute de tension en ligne dans le cas de courant alternatif à 50 *p/s*;

4° la tension nécessaire à l'origine de la ligne.

3. Un réfrigérateur domestique, à compression, de 120 dm^3, est équipé avec un moteur de 0,1 *ch* dont le rendement est 0,75. Ce moteur fonctionne en moyenne, au cours d'une année, 8 heures par jour pendant 2 mois, 6 heures pendant 6 mois et 4 heures pendant 4 mois. Combien de kilowatts-heures consomme-t-il annuellement?

4. Peut-on se servir d'un fer à repasser électrique de 200 *W*, 110 *V* en mettant en série avec l'instrument des lampes de 40 *W*, 110 *V* pour brancher le tout sur un réseau à 220 *V*?

Combien faudra-t-il de lampes et comment les disposera-t-on pour que le fer à repasser fonctionne normalement? Quelle sera la puissance totale absorbée et comment se répartira-t-elle entre le fer et les lampes?

Que deviendrait la puissance du fer si l'on remplaçait une seule des lampes de 40 *W* par une lampe de 60 *W*?

5. L'étude de l'effet du changement de la température d'un conducteur métallique sur sa résistance a fait l'objet de la 11e leçon. On a conclu qu'en désignant par R et R_t les résistances du conducteur respectivement à 0°C et à t°C $R_t = R(1 + at)$, a est le coefficient d'augmentation de la *résistance* par degré ou plus brièvement le coefficient de température du métal. Pour le cuivre, ce coefficient est 0,004.

Cette étude peut être conduite autrement. Soit un conducteur cylindrique de longueur 1 *cm* et de diamètre *d cm* à 0°. A *t* degrés, la longueur devient $l(1 + \lambda t)$ et le diamètre $d(1 + \lambda t)$, λ étant le coefficient de dilatation linéaire du métal, la résistivité ρ à 0° devient à t° $\rho(1 + \alpha t)$, α est le coefficient d'augmentation de la *résistivité* par degré.

Calculer la résistance R_t en fonction de R et déterminer la relation existant entre a, α et λ.

Pour le cuivre $\lambda = 1{,}7 . 10^{-5}$.

Relation entre la tension aux bornes d'un récepteur seulement inductif et l'intensité du courant.

Beaucoup de circuits électriques possèdent à la fois résistance et auto-induction. Ces deux propriétés sont inséparables.

Un conducteur rectiligne est fort peu inductif. Si on l'enroule toujours dans le même sens pour en faire une bobine, son inductance augmente, mais sa résistance reste invariable. Pour une bobine sans noyau de fer, le rapport $L : R$, appelé ***constante de temps*** de la bobine, dépasse rarement 0,01; L est donc le plus souvent inférieur à R : 100.

Dans la présente leçon, pour simplifier, nous supposons un circuit simplement inductif, sans résistance. Cette hypothèse est donc bien différente de la réalité.

Soient L *henrys* l'inductance de ce circuit. U *volts* la tension efficace à ses bornes, I *ampères* l'intensité efficace dans le circuit et ω *radians par seconde* la pulsation du courant.

I. On démontre[1] par le calcul, quand la tension est sinusoïdale, que :

1° ***tension efficace, intensité efficace et inductance sont liées par la relation :***

$$\underset{\text{Ampères}}{I} = \frac{\overset{\text{Volts}}{U}}{\underset{\text{Henrys}}{L}\ \underset{\text{rad/s}}{\omega}}$$

L'expression L ω se nomme la ***réactance*** du circuit et s'évalue en *ohms* comme une résistance. On remarquera que la réactance inductive est proportionnelle à la fréquence, puisque $\omega = 2\pi f$.

2° ***la puissance dépensée dans le circuit est nulle;***

3° ***l'intensité et la tension sont en quadrature, l'intensité étant déphasée en arrière de la tension.***

1. Voir la note complémentaire, page 391.

2. Vérifions ces résultats.

A priori, nous savons que notre vérification expérimentale ne peut être que grossière : ou bien la bobine employée n'a pas de noyau de fer et, pour qu'elle ait une inductance suffisante, elle comporte beaucoup de spires et sa résistance est importante; ou bien elle est à noyau de fer, formant un circuit magnétique fermé, elle a peu de spires et sa résistance est faible, mais son inductance est variable suivant l'induction magnétique dans le noyau.

Nous nous servons d'une bobine sans noyau dont l'inductance est 0,1 *henry* et la résistance 9 ohms.

a) ***Intensité.*** — Un voltmètre est en dérivation sur la bobine; un ampèremètre est monté en série, un rhéostat n'est pas nécessaire (fig. 1).

1° *Influence de la tension.* — Une tension aux bornes du circuit de 115 volts, fréquence 50, produit une intensité de 3,5 ampères; une tension de 200 volts produit 6 ampères.

Or[1],

$$\frac{3,5}{115} \simeq \frac{6}{200}$$

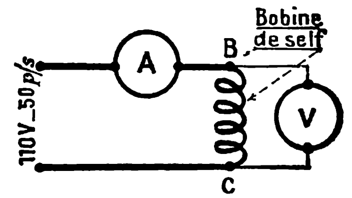


Fig. 1. — Montage d'une bobine avec ampèremètre et voltmètre.

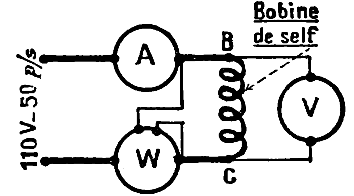


Fig. 2. — Un wattmètre est ajouté au montage précédent.

L'intensité du courant est proportionnelle à la tension.

2° *Influence de l'inductance.* — *Augmentons l'inductance* de la bobine en plaçant à l'intérieur un petit noyau de fer : *l'intensité diminue.*

L'intensité varie donc en sens inverse de l'inductance; nous admettrons qu'elle lui est inversement proportionnelle.

3° *Influence de la fréquence.* — Utilisons une tension de 115 volts à 25 périodes par seconde : l'intensité devient 5,5 ampères :

L'intensité varie donc en sens inverse de la fréquence, nous admettrons qu'elle est inversement proportionnelle.

b) ***Puissance.*** — Mesurons avec un wattmètre la puissance dépensée dans la bobine quand elle absorbe 3,5 ampères, sous 115 volts, à la fréquence 50 Hz (fig. 2). Nous trouvons 110 watts.

Cette puissance est bien inférieure au produit UI ($115 \times 3,5 \simeq 400$). Remarquons qu'elle correspond à la perte en chaleur Joule, RI^2, due à la résistance électrique de la bobine[2]. Nous en concluons que, du fait de l'auto-induction, *aucune puissance n'est absorbée.*

1. Le signe $\simeq$, qui est normalisé, se lit *sensiblement égal à.*
2. En effet, ici R = 9 *ohms*, I = 3,5 *ampères*. $RI^2 = 9 \times 12,25 \simeq 110$ *watts*.

c) ***Décalage de l'intensité sur la tension.*** — L'oscillographe double de démonstration employé comme dans la leçon précédente donne sur l'écran les deux courbes représentées par la figure 3 : *l'intensité est décalée en arrière de la tension d'un quart de période.*

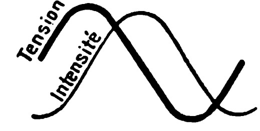


Fig. 3. — Courbes obtenues à l'oscillographe : l'intensité est *décalée* d'un quart de période en arrière de la tension entre les bornes de la self.
Le déphasage est de $\pi/2$.

3. Une bobine dans un circuit réduit l'intensité du courant, comme une résistance, mais sans perte d'énergie.

C'est la réactance L ω de la bobine qui joue le rôle de résistance. Cette réactance est proportionnelle à la fréquence. Il en résulte qu'il suffit d'une inductance faible pour s'opposer au passage d'un courant à haute fréquence.

La réduction de l'intensité d'un courant par une résistance est corrélative d'une perte de puissance en chaleur Joule. Une bobine ne produit pas de pertes puisqu'elle n'absorbe pas de puissance, mais elle cause un décalage.

Quand les lampes à arc étaient fort employées, il y a quelques dizaines d'années, on utilisait des bobines pour régler l'intensité absorbée. Ces bobines comportaient un noyau de fer formant un circuit magnétique dont on faisait varier les entrefers pour obtenir une valeur convenable de l'inductance.

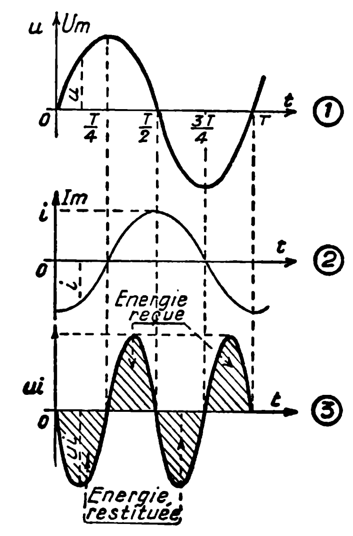


Fig. 4. — Courbes de la *tension*, de l'*intensité*, de la *puissance instantanée* dans une réactance pure. Les surfaces couvertes de hachures correspondent aux *énergies* mises en jeu.
La *puissance moyenne* est *nulle*.

4. Pourquoi une réactance ne consomme-t-elle pas de puissance ?

Dans une bobine, supposée sans résistance, l'intensité du courant est décalée d'un quart de période en arrière de la tension (ou *déphasée* de $\pi : 2$).

La tension à l'instant t étant représentée par l'expression :

$$u = U_m \sin \omega t,$$

l'intensité au même instant l'est par

$$i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Construisons, comme nous l'avons fait dans la leçon précédente, les courbes de u (fig. 4, courbe 1), de i (courbe 2), de ui (courbe 3).

Quand u et i sont de même signe, le produit ui est positif, la bobine absorbe de l'énergie : elle fonctionne comme *récepteur*.

Quand u et i sont de signes contraires le produit ui est négatif, la bobine restitue de l'énergie au reste du circuit au lieu d'en recevoir : elle fonctionne comme *générateur* (Voir exercice 4).

La bobine fonctionne comme un récepteur deux fois par période, comme un générateur deux fois par période. La courbe 3 montre qu'elle restitue autant d'énergie qu'elle en reçoit. Donc la puissance dépensée est nulle.

5. Représentation vectorielle de la tension et de l'intensité.

L'intensité est représentée par le vecteur $\overrightarrow{OI}$, la tension par le vecteur $\overrightarrow{OU}$; *les deux vecteurs sont à angle droit* et *l'intensité en arrière de la tension* (fig. 5).

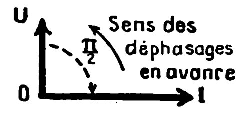


Fig. 5. — Représentation vectorielle de la tension et de l'intensité dans une réactance pure. Le vecteur intensité I est *déphasé* de π : 2 sur le vecteur tension U.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

1. Appliquons la loi d'Ohm généralisée à la portion de circuit BC (fig. 1).

Le courant y circule : 1° sous l'action de la tension u entre les points B et C, tension appliquée par le secteur;

2° sous l'action de la *f. é. m.* d'auto-induction $-\mathrm{L}\frac{di}{dt}$ due aux variations du courant.

On a donc :
$$u - \mathrm{L}\frac{di}{dt} = \mathrm{R}i \qquad (1)$$

R étant la résistance électrique de la bobine. Mais nous supposons que cette résistance est nulle. Donc
$$u - \mathrm{L}\frac{di}{dt} = 0$$

ou
$$\frac{di}{dt} = \frac{u}{\mathrm{L}} = \frac{U_m}{\mathrm{L}}\sin\omega t \qquad (2)$$

i est donc une fonction du temps dont la dérivée est $\frac{U_m}{\mathrm{L}}\sin\omega t$; donc
$$i = -\frac{U_m}{\mathrm{L}\omega}\cos\omega t + C^{te}. \qquad (2)$$

Si la tension appliquée était nulle, on aurait $U_m = 0$ et aussi $i = 0$ puisqu'il n'y aurait pas de courant.

Or, la formule (2) donnerait :
$$0 = 0 + C^{te}.$$

La constante est donc nulle et
$$i = -\frac{U_m}{\mathrm{L}\omega}\cos\omega t = \frac{U_m}{\mathrm{L}\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

ce qui prouve :

1° que l'intensité maximum dans la bobine est

$$I_m = \frac{U_m}{L\omega} \quad \text{et par suite} \quad \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m : \sqrt{2}}{L\omega} \quad \text{ou} \quad I = \frac{U}{L\omega}$$

2° que l'intensité est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ *en arrière* de la tension.

3° La puissance absorbée à l'instant t par la self (puissance instantanée), est

$$ui = U_m \sin \omega t \times \left(-\frac{U_m}{L\omega} \cos \omega t\right)$$

$$= -\frac{U_m^2}{L\omega} \sin \omega t \cos \omega t$$

$$= -\frac{1}{2}\frac{U_m^2}{L\omega} \sin 2\omega t.$$

C'est une fonction sinusoïdale de t de période $\frac{T}{2}$ (fig. 4). **(3)**

Pendant une période, la valeur moyenne de cette puissance instantanée est nulle. Donc, pendant un nombre entier de périodes, une inductance pure n'absorbe aucune énergie.

Exercices.

1. Une bobine, sans noyau de fer, de résistance négligeable, absorbe 10 *A* sous une tension de 110 *V* de fréquence 50 *p/s*.

Quelle intensité absorberait-elle sous la tension de 220 *V*, fréquence 100 *p/s*?

2. Entre deux points A et B, on maintient une tension alternative de 110 *V* 50 *p/s*. On monte en dérivation entre A et B une résistance pure de 10 Ω et une bobine d'inductance 0,032 henry dont la résistance est négligeable.

1° Calculer l'intensité dans chaque branche de la dérivation et le déphasage de chaque courant sur la tension.

2° Déterminer graphiquement l'intensité totale dans la ligne et son déphasage sur la tension entre les bornes des circuits dérivés.

3. Un récepteur est constitué par une inductance pure et une résistance pure en dérivation sur la bobine. On lui applique une tension alternative de 100 *V*, 50 *p/s*.

Déterminer la valeur de l'inductance et celle de la résistance pour que le récepteur absorbe une intensité totale de 5 A déphasée de $\pi : 6$ en arrière de la tension.

4. Une inductance pure reçoit du courant alternatif sinusoïdal.

On considère ce qui se passe pendant une période à partir de l'instant où l'intensité est nulle et va croissant ensuite dans le sens positif. (Voir fig. 4, courbes 2 et 3).

a) Pendant quelles fractions de la période la bobine reçoit-elle de l'énergie? Comment *varient* le courant dans la bobine et l'induction magnétique créée par la bobine pendant ces fractions de période?

b) Pendant quelles fractions de la période la bobine restitue-t-elle de l'énergie? Comment *varient* le courant dans la bobine et l'induction magnétique créée par la bobine pendant ces fractions de période?

c) Que pouvez-vous conclure de ces remarques? Rapprochez de ces conclusions ce que vous avez appris en courant continu sur l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique d'une bobine.

Circuit composé d'une résistance et d'une inductance en série.

I. Expériences.

Constituons un circuit avec un rhéostat de lampes AB et, en série, une bobine BC (bobine de 240 spires, avec un noyau de fer formant un circuit magnétique fermé, résistance du conducteur négligeabe).

Montons dans le circuit : voltmètres, ampèremètre et wattmètre (fig. 1).

Aux bornes de l'ensemble, amenons une tension alternative de fréquence 50 *hertz*.

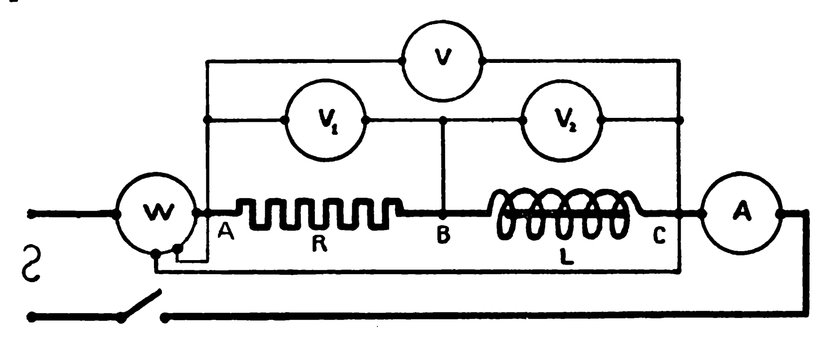


Fig. 1. — Circuit composé d'une résistance R et d'une self L, en série. Schéma de montage des appareils de mesure : ampèremètre, voltmètre, wattmètre.

Les mesures faites donnent les valeurs suivantes :

tension entre les bornes extrêmes A et C :	$U = 116$		*volts*,
tension entre les bornes A et B de la résistance :	$U_1 = 90$		*volts*
tension entre les bornes B et C de l'inductance :	$U_2 \simeq 73{,}2$		*volts*
intensité dans le circuit :	$I = 4$		*ampères*
puissance absorbée par l'ensemble :	$P = 360$		*watts*.

Nous remarquons :

1° que la tension U entre les bornes A et C du circuit est inférieure à la somme arithmétique des tensions partielles U_1 entre A et B et U_2

entre B et C. Nous en concluons que les tensions U_1 et U_2 ne sont pas en phase.

En général, des tensions alternatives en série ne s'ajoutent pas arithmétiquement comme des tensions continues.

2° que la puissance mesurée P = 360 *W* est inférieure au produit UI = 464 de la tension par l'intensité.

Nous pouvons calculer un nombre k, inférieur à 1, tel que :

$$P = kUI.$$

Le nombre k, variable avec le circuit, se nomme *facteur de puissance du circuit considéré.*

La puissance P est la *puissance réelle* exprimée en *watts;* on donne au produit UI le nom de *puissance apparente* et on l'évalue en *volts-ampères* (*VA*).

Dans l'expérience faite, la puissance apparente est 116 × 4 = 464 *volts-ampères,* la puissance réelle mesurée au wattmètre 360 *watts* et le facteur de puissance du circuit AC est 360 : 464 ≃ 0,78.

2. Relation entre U et I : impédance d'un circuit.

Utilisons pour l'étude du circuit ABC les connaissances acquises dans les deux leçons précédentes.

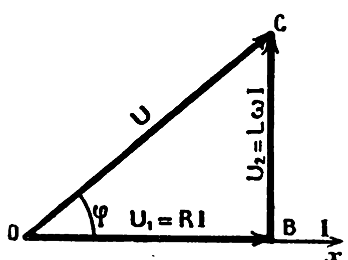


Fig. 2. — Épure correspondant à l'expérience de la figure 1.

a) Dans la résistance pure AB, tension entre bornes A et B et intensité sont en phase. En choisissant pour origine des phases, représentée par Ox, la phase de l'intensité, la tension U_1 est représentée par le vecteur $\overrightarrow{OB}$ (fig. 2).

Dans l'inductance pure, la tension U_2 entre les bornes B et C est déphasée de π : 2 en avant de l'intensité. Nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{BC}$ perpendiculaire à Ox.

Le vecteur $\overrightarrow{OC}$ qui est la somme géométrique de U_1 et de U_2 figure donc la tension totale U entre bornes A et C.

Le triangle OBC est rectangle :

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2. \qquad (1)$$

Les résultats des mesures faites dans l'expérience ci-dessus donnent en effet :

$$116^2 \simeq 90^2 + 73{,}2^2.$$

b) Pour la résistance AB

$$U_1 = RI$$

pour l'inductance BC

$$U_2 = L\omega I.$$

et la relation (1) devient

$$U^2 = R^2I^2 + L^2\omega^2I^2$$
$$= I^2(R^2 + L^2\omega^2)$$

soit

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \qquad (2)$$

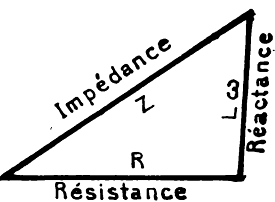


Fig. 3. — La réactance $L\omega$ **et l'impédance Z d'un circuit s'évaluent en** *ohms* **comme la résistance électrique** R**.** $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$.

Cette expression est analogue à la formule d'Ohm *pour le courant* continu. La valeur $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ s'appelle l'*impédance* du circuit; on la représente par la lettre Z et on l'évalue en ohms (fig. 3).

$$\underset{\text{Ampères}}{I} = \frac{\overset{\text{Volts}}{U}}{\underset{\text{Ohms}}{Z}}$$

$$\underset{\text{Ohms}}{Z} = \sqrt{\underset{\text{Ohms}}{R^2} + \underset{\text{Henry}}{L^2}\;\underset{\text{rad/s}}{\omega^2}}$$

L'intensité du courant alternatif est égale au quotient de la tension aux bornes du circuit par l'impédance du circuit.

c) La figure 2 montre que l'intensité I est déphasée *en arrière* de la tension U d'un angle φ tel que

$$\text{tg}\varphi = \frac{L\omega I}{RI}$$

soit

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{L\omega}{R}$$

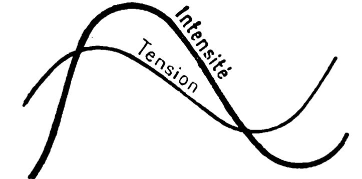


Fig. 4. — *Courbes obtenues à l'oscillographe double :* l'intensité est déphasée en arrière de la tension.

Expérience. — Avec l'oscillographe double de démonstration, ce déphasage est rendu visible. Les courbes obtenues ont l'aspect de la figure 4.

3. Valeur du facteur de puissance k du circuit ABC.

Dans le circuit résistance et inductance que nous étudions, l'inductance BC n'absorbe pas de puissance. La puissance P est dépensée tout entière dans la résistance AB.

Donc

$$P = RI^2.$$

Or, d'après la figure 2.

$$RI = U \cos\varphi.$$

L'expression de la puissance est ainsi :

$$\boxed{P = UI \cos\varphi.} \quad (3)$$

Nous l'avons écrite plus haut :

$$P = kUI.$$

Le facteur de puissance k est donc égal au cosinus de l'angle φ de déphasage de l'intensité sur la tension.

Pour le circuit ABC du paragraphe 1, on a par conséquent $\cos\varphi \simeq 0,78$.

Remarquons que la formule (3) s'applique aussi quand le circuit est une résistance pure (φ est nul et $\cos\varphi = 1$), et quand le circuit est une inductance pure ($\varphi = \pi : 2$ et $\cos\varphi = 0$).

Traçons, comme nous l'avons fait dans les leçons précédentes, les courbes de l'intensité i et de la tension u entre bornes :

$$i = I_m \sin\omega t$$
$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Nous en tirons celle de la puissance instantanée ui (fig. 5). Nous voyons que le circuit *absorbe de l'énergie* pendant que u et i sont de même signe et *en restitue* pendant le temps où u et i sont de signes contraires. Le circuit est successivement *récepteur* et *générateur*.

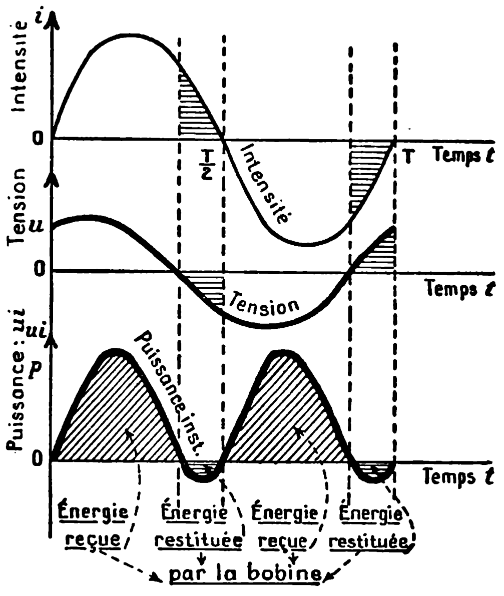


Fig. 5. — *Courbe de l'intensité, de la tension, de la puissance instantanée d'un courant alternatif dans une résistance et une inductance.*

Pendant deux fractions de la période, l'*énergie mise en jeu est positive* : c'est de l'énergie *reçue* par la bobine. Pendant deux autres fractions, l'*énergie est négative* : c'est de l'énergie *restituée* par la bobine.

Quand le déphasage φ entre tension et intensité croît, le temps pendant lequel le circuit est récepteur diminue, le temps pendant lequel il est générateur augmente, la puissance effectivement dépensée dans le circuit va diminuant.

4. Mesure du cos φ d'un appareil ou d'une installation.

a) D'après la formule $P = UI \cos\varphi$

la valeur du facteur de puissance est

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}.$$

Pour l'obtenir, on mesure P avec un wattmètre, U et I avec un voltmètre et un ampèremètre et l'on divise la puissance réelle P par la puissance apparente UI.

b) Cette méthode exige trois appareils de mesure dont les lectures doivent être simultanées. On construit des instruments spéciaux pour la mesure directe du cos φ, on les nomme *phasemètres :* nous en indiquerons le principe page 411.

5. Mesure d'une inductance.

La formule $U = I\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ fournit un moyen de déterminer l'inductance L d'un appareil.

On applique à ses bornes une tension alternative U que l'on mesure avec un voltmètre. On mesure avec un ampèremètre l'intensité I du courant qui s'établit. On fait le quotient U : I; c'est l'impédance de l'appareil.

$$\sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = \frac{U}{I} = Z.$$

En employant du courant continu, on mesure la résistance R. On déduit, des valeurs trouvées pour Z et R, la réactance $L\omega$

$$L\omega = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

La fréquence f du courant employé à la mesure de Z étant connue, on calcule $\omega = 2\pi f$ et l'on détermine

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}.$$

Cette méthode ne convient que pour des bobines qui supportent une intensité assez grande pour pouvoir être mesurée avec un ampèremètre.

6. Chute de tension dans une ligne de transport d'énergie par courant alternatif.

Dans une telle ligne, il se produit :

1° une perte de puissance par chaleur Joule, RI^2;

2° une chute de tension proportionnelle à l'impédance de la ligne et non pas seulement à sa résistance.

Nous avons dit que, pour une ligne bifilaire ordinaire faite d'un fil de 10 *mm* de diamètre ou d'un câble de section équivalente, *l'inductance par kilomètre* est de l'ordre de 0,001 *henry*, soit une réactance de 0,3 *ohm* pour la fréquence 50 *Hz*. La résistance ohmique est environ 0,5 *ohm*. On voit que résistance et réactance sont ici du même ordre de grandeur.

Exercices.

1. Une bobine a une résistance de 5 ohms et une inductance de 0,05 henry. On applique à ses bornes une tension alternative de 110 volts, fréquence 50 hertz
Calculer :
1° la réactance de la bobine,
2° son impédance,
3° l'intensité du courant qui la traverse,
4° le déphasage de l'intensité sur la tension,
5° la puissance apparente absorbée,
6° la puissance réelle consommée.

2. Une bobine sous une tension continue de 21 volts est parcourue par un courant de 6 ampères.
Sous une tension alternative de 114 volts à 50 périodes par seconde, elle est traversée par un courant de 3 ampères.
Calculer :
1° sa résistance,
2° son impédance,
3° son inductance.

3. Un moteur à courant alternatif 110 volts, fréquence 50, absorbe en charge 50 ampères. Un wattmètre indique qu'il consomme 4 400 watts.
Quel est le cos φ du moteur?

4. Quelle est l'intensité absorbée à pleine charge par un moteur à courant alternatif de 2 *ch*, 110 *V*, dont le rendement est 0,75 et le cos φ 0,80?

5. Un four électrique absorbe 10 000 ampères de courant alternatif de fréquence 50.
Ce courant est amené au four par deux conducteurs cylindriques en cuivre de 10 *cm* de diamètre, ayant chacun 20 *m* de long. La distance entre les axes des conducteurs est 50 *cm*.
1° Calculer la résistance ohmique de la ligne sachant qu'un fil de cuivre de 1 *mm* de diamètre et de 1 *m* de long a une résistance de 0,022 ohms.
2° Le coefficient de self-induction de la ligne est 1,02 millihenry par kilomètre de ligne bifilaire. Quelle est l'impédance de la ligne employée?
3° Quelle est la chute de tension en ligne?
4° La cause la plus importante de cette chute de tension est-elle la résistance ou la réactance des conducteurs?

Circuit comportant une capacité.

I. Le circuit ne comporte qu'un condensateur, sans résistance ni inductance.

A. *On démontre*[1] *que, pour un courant sinusoïdal* :

1° tension efficace, intensité efficace et capacité sont liées par la relation :

$$\underset{\text{Ampères}}{I} = \underset{\text{Volts.}}{U} \quad \underset{\text{Farads.}}{C} \quad \underset{\text{rad/s.}}{\omega} \qquad (1)$$

On écrit aussi l'expression (1) sous la forme :

$$I = \frac{U}{\frac{1}{C\omega}}$$

on donne à $\frac{1}{C\omega}$ le nom de ***réactance de capacité*** et on l'exprime en *ohms*. La réactance de capacité est inversement proportionnelle à la fréquence.

2° la puissance dépensée dans la capacité est nulle;

3° l'intensité et la tension sont en quadrature, l'intensité étant déphasée en avant de la tension d'un quart de période.

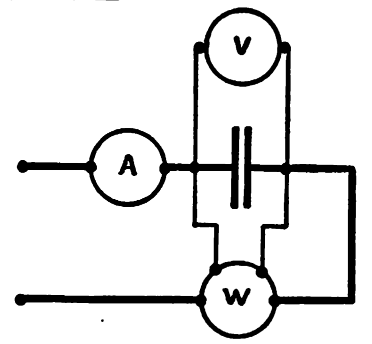


Fig. 1. — Décrivez ce montage destiné à l'étude expérimentale du courant dans un circuit comportant une capacité.

B. *Nous vérifions ces résultats* par des expériences analogues à celles que nous avons faites dans le cas d'une inductance (fig. 1) :

a) ***Intensité.***

1° Sous 110 volts à ses bornes, à la fréquence de 50 périodes par seconde, un condensateur de 100 microfarads absorbe 3,5 ampères; sous 200 volts, à la même fréquence, 6,4 ampères.

L'intensité du courant est donc proportionnelle à la tension aux bornes du condensateur.

1. Voir la note complémentaire, page 393.

2° Avec un condensateur de 50 microfarads, dans les mêmes conditions, l'intensité du courant est 1,8 ampère et 3,2 ampères.

L'intensité est proportionnelle à la capacité.

3° En employant du courant à 25 périodes par seconde, sous 110 volts, dans un condensateur de 100 microfarads, l'intensité est 1,7 ampère; avec du courant à 12,5 périodes par seconde, 0,8 ampère.

L'intensité est proportionnelle à la fréquence.

b) ***Puissance.***

Un wattmètre monté dans le circuit n'indique aucune puissance appréciable.

c) ***Déphasage du courant sur la tension.***

L'oscillographe double de démonstration donne les courbes de la figure 2. Celle de l'intensité est déphasée d'un quart de période en avant de celle de la tension.

C. ***Construisons par points la courbe ui de la puissance instantanée.*** Traçons d'abord la courbe de la tension entre les armatures

$$u = U_m \sin \omega t$$

et celle de l'intensité

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

puis celle de *ui* (fig. 3); nous cons-

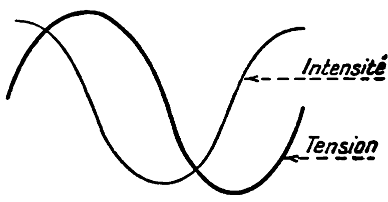


Fig. 2. — Courbes obtenues à l'oscillographe : l'intensité est déphasée d'un quart de période en avant de la tension

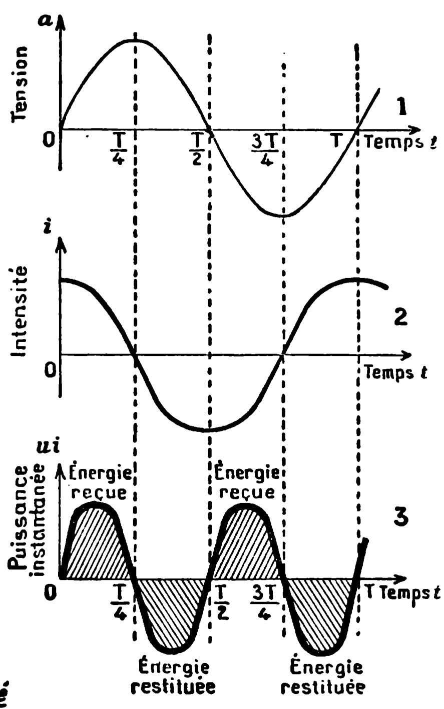


Fig. 3. — Courbe de la tension, de l'intensité, de la puissance instantanées dans une capacité pure.
1° L'intensité est en avance de T/4 sur la tension.
2° Pendant un quart de période le condensateur *reçoit* de l'énergie; pendant le quart de période suivant, il en *restitue*. La puissance moyenne dépensée dans le condensateur pendant chaque période est *nulle*.

tatons que la puissance dans un condensateur est alternative, de fré-

quance $2f$ périodes par seconde et que sa valeur moyenne, pour un nombre entier de périodes du courant, est nulle.

D. ***On représente***, dans le cas d'une capacité pure, tension et intensité par le diagramme vectoriel de la figure 4.

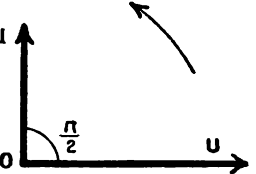


Fig. 4. — Représentation vectorielle de l'intensité et de la tension dans le cas d'une capacité pure.
L'intensité est déphasée en avant de la tension d'un angle $\frac{\pi}{2}$ (soit un quart de période).

2. Le circuit comporte *en série* : résistance, inductance et capacité.

Expérience. — En série avec une bobine dont la résistance est 9 *ohms*, plaçons un condensateur de 50 *microfarads* (fig. 5).

Aux bornes de l'ensemble, appliquons une tension U de 110 *volts*, à 50 *hertz*.

L'intensité du courant est I = 3,2 *ampères*.

La tension entre les bornes A et C de la bobine est U_1 = 105 *volts*, entre les bornes C et D du condensateur 206 *volts*.

Nous remarquons que la tension totale U est inférieure à la somme arithmétique des tensions partielles U_1 et U_2; nous savons que ce fait signifie que les trois tensions ne sont pas en phase.

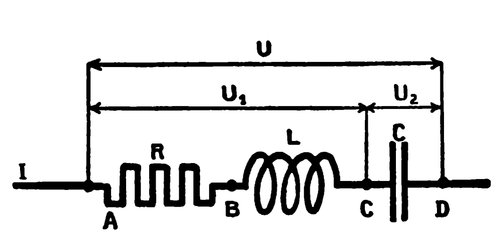


Fig. 5. — Circuit formé d'une résistance, d'une self et d'une capacité en série.
En réalité, la résistance et la self sont fournies par le même appareil : une bobine de self.
La capacité est due à un condensateur en série avec la bobine.

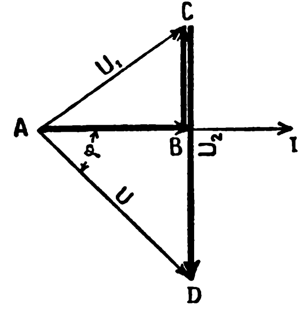


Fig. 6. — Représentation vectorielle des tensions dans le circuit figure 5.

Étude graphique des phénomènes. — Le même courant traverse tous les éléments du circuit : c'est une raison pour choisir sa phase comme origine des phases (fig. 6).

Dans la résistance R de la bobine, la chute de tension RI est en phase avec l'intensité I : nous la représentons par le vecteur $\vec{AB}$.

La chute de tension due à l'inductance est $L\omega I$; elle est déphasée de $\pi : 2$ *en avant* de l'intensité : nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{BC}$.

La tension aux bornes de la capacité est $\frac{I}{C\omega}$, elle est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ *en arrière* de l'intensité : nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{CD}$.

La tension totale U entre A et D est donc $\overrightarrow{AD}$.

Remarquons que la tension U_1 est représentée par le vecteur $\overrightarrow{AC}$. Les trois tensions U, U_1, U_2 sont les côtés du triangle ACD. La tension U peut être inférieure ou supérieure à chacune des tensions composantes U_1 et U_2 suivant la composition du circuit; mais elle est toujours inférieure à leur somme.

Formules tirées du graphique.

a) Le triangle ABD est rectangle, donc :

$$\overline{AD}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{BD}^2.$$

Remplaçons les segments par les valeurs qu'ils représentent :

$$U^2 = R^2I^2 + \left(L\omega I - \frac{I}{C\omega}\right)^2$$

soit, en mettant I^2 en facteur commun :

$$U^2 = I^2\left[R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2\right]$$

d'où :

$$\boxed{I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}.} \qquad (1)$$

La quantité $\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ se nomme encore ***impédance*** et s'évalue en ohms.

b) La tension U est déphasée par rapport à l'intensité de l'angle φ tel que :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{BD}{AB} = \frac{L\omega I - \frac{I}{C\omega}}{RI}$$

soit :

$$\boxed{\operatorname{tg}\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}} \qquad (2)$$

Le déphasage est en avant de l'intensité si $L\omega$ est supérieur à $\frac{1}{C\omega}$; il est en arrière si $L\omega$ est inférieur à $\frac{1}{C\omega}$.

c) La seule *puissance* dépensée dans le circuit est la puissance RI^2 consommée dans la résistance. On a donc :

$$P = RI^2.$$

Or (fig 6), $RI = U \cos\varphi$

donc $\boxed{P = UI \cos\varphi.}$ (3)

REMARQUE. — Les formules (1) (2) et (3) sont générales; elles s'appliquent à tous les circuits, qu'ils soient constitués ou d'une résistance pure, ou d'une inductance pure, ou d'une capacité pure, ou qu'ils possèdent à la fois de la résistance, de l'inductance et de la capacité.

3. Résonance et condition de résonance.

a) Dans l'expérience du paragraphe 2 nous avons constaté que la tension entre les bornes du condensateur (206 V) est bien supérieure à celle qui est appliquée aux bornes du circuit (110 V).

Recommençons l'expérience en remplaçant l'inductance fixe par une bobine à noyau de fer mobile dont nous ferons varier l'inductance en retirant plus ou moins le noyau de la bobine. Pour ne pas détériorer les appareils, nous ne mettons qu'une tension de 30 volts aux bornes du circuit. Une lampe de 220 volts, remplaçant un voltmètre, est montée en dérivation aux bornes du condensateur (fig. 7).

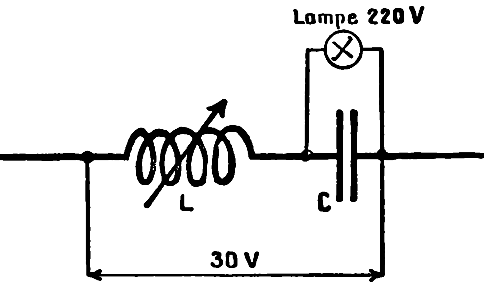


Fig. 7. — Montage d'un condensateur et d'une inductance réglable en série pour produire le phénomène de résonance.

Pour une position déterminée du noyau dans la bobine, la lampe brille d'un vif éclat : la tension aux bornes du condensateur, qui atteint près de 220 volts, est environ sept fois supérieure à la tension aux bornes du circuit total.

Plaçons la lampe aux bornes de la bobine. En réglant l'inductance la lampe fonctionne aussi sous une tension voisine de 220 volts.

Donc, quand une bobine et un condensateur sont en série dans un circuit à courant alternatif, des surtensions considérables se produisent

aux bornes de la bobine et du condensateur pour des valeurs déterminées de l'inductance et de la capacité.

b) La discussion de la formule

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

fournit l'explication de ce phénomène.

L'impédance du circuit est minimum quand

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}, \qquad \text{soit} \qquad LC\omega^2 = 1.$$

Elle se réduit alors à la résistance ohmique R.

L'intensité efficace est maximum, sa valeur atteint :

$$I' = \frac{U}{R}.$$

Les tensions aux bornes de l'inductance et de la capacité sont aussi maximum et valent :

$$U' = L\omega I' = \frac{I'}{C\omega}.$$

Enfin puisque

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} = 0$$

l'intensité est en phase avec la tension totale.

On dit que le ***circuit est en résonance.***

La condition de résonance est :

$$\boxed{LC\omega^2 = 1.}$$

On peut dont obtenir la résonance en faisant varier soit L, soit C, soit la fréquence du courant dont dépend ω ($\omega = 2\pi f$).

c) Dans les circuits industriels, la résonance est à éviter parce qu'elle produit des surtensions dangereuses pour le personnel et le matériel. Dans les récepteurs de TSF, où les tensions captées dans l'espace par les antennes ou les cadres sont très faibles (de l'ordre du microvolt), il est nécessaire, au contraire, de mettre les circuits en résonance pour y obtenir des intensités ou des tensions suffisantes pour être décelées.

4. Circuit bouchon.

Soit le problème suivant :

Entre les extrémités A et B d'une ligne sous tension alternative de U volts à la fréquence f périodes par seconde sont montés en dérivation une bobine

d'inductance L supposée sans résistance et un condensateur de capacité C (fig. 8).

Bobine et condensateur satisfont à la condition de résonance $LC\omega^2 = 1$. *Calculer le courant total dans la ligne.*

L'intensité dans la bobine est $\frac{U}{L\omega}$; elle est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ *en arrière* de la tension U. — (Faire la figure.)

L'intensité dans le condensateur est $UC\omega$; elle est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ *en avant* de la tension U.

Les deux intensités sont égales puisque la condition de résonance $LC\omega^2 = 1$ peut s'écrire

$$\frac{1}{L\omega} = C\omega$$

d'où

$$\frac{U}{L\omega} = UC\omega.$$

Les deux intensités étant égales et opposées, leur somme est nulle : *l'intensité totale dans la ligne est nulle.*

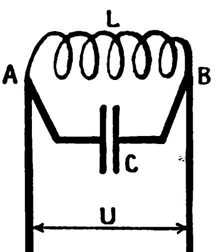


Fig. 8. — Quand le circuit ALBC est en résonance il forme bouchon.

Un circuit tel que ALBC dans lequel la condition de résonance est réalisée s'oppose au passage du courant de A en B. On le nomme un *circuit bouchon.*

L'effet bouchon est en réalité imparfait, car les deux branches de la dérivation possèdent quelque résistance. Les intensités ne sont pas exactement en quadrature avec la tension, elles ne s'opposent pas rigoureusement et leur somme géométrique n'est pas tout à fait nulle.

Il faut surtout remarquer que la résonance n'est réalisée dans un circuit donné que pour une *fréquence déterminée.* L'effet bouchon ne se produit pas pour d'autres fréquences. Ce montage fournit donc un moyen, quand deux courants à *fréquences différentes* sont superposés, d'éliminer celui dont la fréquence ne convient pas.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Soient A et B les armatures d'un condensateur de capacité *C* farads (fig. 9);

u, la tension appliquée par le secteur entre les armatures à l'instant t;

i, l'intensité du courant à cet instant t.

u est par hypothèse une fonction sinusoïdale du temps

$$u = U_m \sin \omega t.$$

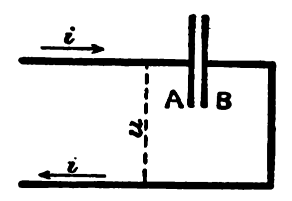


Fig. 9. — A un instant donné t, le courant est i ampères dans les fils de ligne et la tension u volts entre les armatures A et B.

Pendant l'intervalle de temps infiniment petit dt, qui suit l'instant t, le courant i transporte sur les ar-

matures des quantités d'électricité égales et de signes contraires dont la valeur absolue dq est : $dq = idt$;

la tension entre les armatures varie de :

$$du = \frac{dq}{C} = \frac{i}{C}dt$$

d'où :

$$i = C\frac{du}{dt}$$

$$i = CU_m\omega \cos \omega t$$

$$= CU_m\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Donc : 1° l'intensité maximum I_m est :

$$I_m = CU_m\omega$$

et par suite

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}C\omega$$

$$\boxed{I = UC\omega}$$

2° i est une fonction sinusoïdale du temps déphasée en avant de la tension de $\frac{\pi}{2}$ soit décalée de 1/4 de période.

3° La puissance absorbée à l'instant t par la capacité (puissance instantanée), est :

$$ui = U_m^2 C\omega \sin \omega t \cos \omega t$$

$$= \frac{1}{2}U_m^2 C\omega \sin 2\omega t.$$

C'est une fonction sinusoïdale du temps t de période $\frac{T}{2}$.

Pendant une période, la valeur moyenne de cette puissance instantanée est nulle.

Donc, pendant un nombre entier de périodes, une capacité pure n'absorbe aucune énergie.

Exercices

1. Un condensateur de 20 μF et une bobine d'inductance 0,5 *H* dont la résistance est 10 Ω sont mis en série et alimentés par du courant à 110 *V* de 50 *p/s*.

Chercher :

a) l'impédance du circuit,

b) l'intensité du courant,

c) la tension aux bornes de la bobine,

d) la tension aux bornes du condensateur,

e) le déphasage de l'intensité et de la tension.

2. Une bobine dont la résistance ohmique est 9 Ω et l'inductance *L* est inconnue est montée en série avec un condensateur de 50 μ*F*. Une tension de 200 *V* de fréquence 50 *Hz* produit dans ce circuit une intensité de 2,3 *A*.

Calculer l'inductance de la bobine.

3. Pour quelle fréquence un circuit composé d'une bobine d'inductance 2 *H* et d'un condensateur de 50 μ*F* en série est-il en résonance?

4. **La capacité d'un câble téléphonique est 0,1 *µF* par kilomètre. On place une bobine en série avec le câble tous les 10 *km* pour compenser sa capacité. Quelle doit être l'inductance de cette bobine? La fréquence moyenne des courants téléphoniques est 1 000 *p/s*.**

5. *Mesure du facteur de puissance d'un récepteur à courant alternatif par la méthode des trois voltmètres.*

Un voltmètre en dérivation sur un récepteur à c. a. indique une tension U = 19 *V*. On monte en série avec le récepteur une résistance sans self et on règle la tension

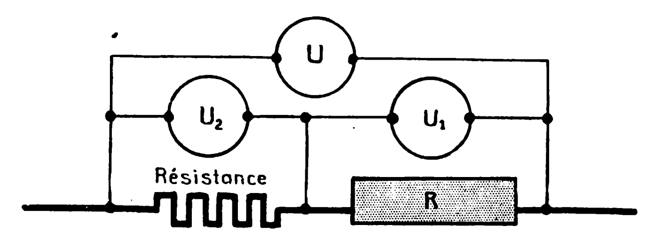


Fig. 10. — Mesure du facteur de puissance du récepteur R avec trois voltmètres.

totale *U* aux bornes extrêmes du circuit pour que la tension U_1 conserve sa valeur 19 *V*. La tension U est alors 43,5 *V* et la tension U_2 aux bornes de la résistance pure est 33 *V* (fig. 10).

Déterminer le cos φ du récepteur.

(Indications sur la solution : U_2 est en phase avec l'intensité, U est la somme géométrique de U_1 et U_2. En construisant le triangle ayant pour côtés U_2, U et U_1, l'angle de U_1 avec U_2 est l'angle de déphasage.

Remarque : Cette méthode, qui n'est pas industrielle, ne peut être employée que si l'on dispose d'une tension presque double de celle qui existe aux bornes de l'appareil étudié.

6. *Mesure du facteur de puissance d'un récepteur à courant alternatif par la méthode des trois ampèremètres* (fig. 11).

Un ampèremètre en série avec le récepteur à c. a. indique une intensité I_1 = 12 *A*.

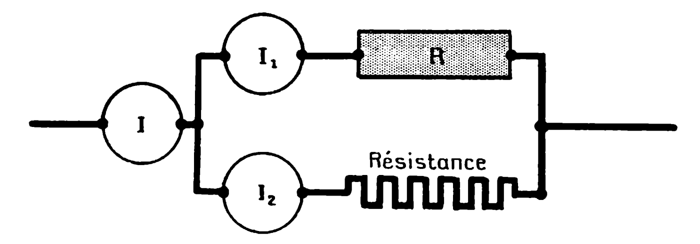


Fig. 11. — Mesure du facteur de puissance du récepteur R avec trois ampèremètres.

On monte en dérivation aux bornes du récepteur une résistance pure; elle absorbe une intensité I_1 = 10 *A*. L'intensité totale dans la ligne est I = 20,4 *A*.

Déterminer le cos φ du récepteur.

Puissance active et puissance réactive.

1. Tension active et tension réactive.

La tension U aux bornes d'un récepteur possédant résistance, self et capacité, est déphasée d'un angle φ par rapport à l'intensité absorbée par l'appareil. Le vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans la figure 1 représente cette tension déphasée en avant de l'intensité.

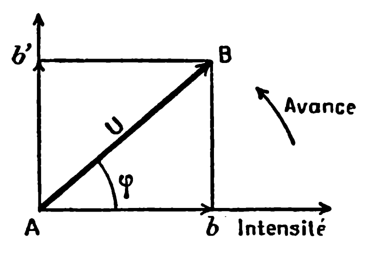


Fig. 1. — La tension U se décompose en une tension active $Ab = U \cos \varphi$ et une tension réactive $Ab' = U \sin \varphi$.

On peut considérer le vecteur $\overrightarrow{AB}$ comme étant la résultante de deux vecteurs perpendiculaires :

$\overrightarrow{Ab} = U \cos \varphi$ *en phase avec l'intensité*

$\overrightarrow{Ab'} = U \sin \varphi$ *en quadrature.*

On donne à $\overrightarrow{Ab} = U \cos \varphi$ le nom de *tension active* parce que c'est l'un des facteurs, dans l'expression $P = IU \cos \varphi$, de la puissance absorbée par le récepteur.

$\overrightarrow{Ab'} = U \sin \varphi$ se nomme *tension réactive;* cette tension n'intervient pas dans la production d'énergie dans le récepteur.

Puisque : $\overline{AB}^2 = \overline{Ab}^2 + \overline{Ab'}^2$, la tension résultante est égale à la racine carrée de la somme du carré de la tension active et du carré de la tension réactive.

2. Dans un circuit formé de plusieurs *récepteurs en série,* les tensions actives s'ajoutent algébriquement et il en est de même des tensions réactives.

Soit un circuit AE constitué par quatre récepteurs en série (fig. 2) :

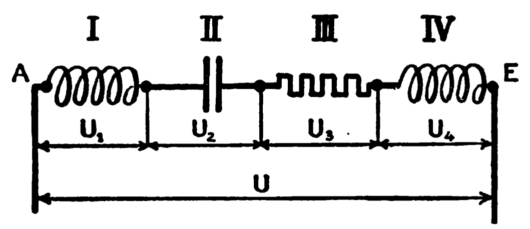


Fig. 2. — Circuit comprenant quatre récepteurs en série.

I est une bobine réelle (R + L);

II est une capacité pure;

III est une résistance pure, c'est-à-dire non inductive;

IV est une bobine réelle.

Une tension alterna-

tive U est appliquée aux bornes extrêmes de l'ensemble. Les tensions entre les extrémités de chaque élément du circuit sont U_1, U_2, U_3, U_4.

Construisons (fig. 3) le diagramme vectoriel de ces tensions en prenant, comme origine des phases, la phase de l'intensité qui est commune à tous les appareils.

La tension U_1, en avance de φ_1 sur l'intensité, est représentée par $\overrightarrow{AB}$;

U_2, déphasée de $\pi : 2$ en arrière de l'intensité, par $\overrightarrow{BC}$;

U_3 en phase avec I, par $\overrightarrow{CD}$;

U_4, déphasée de φ_4, par $\overrightarrow{DE}$.

La tension totale U est représentée par le vecteur $\overrightarrow{AE}$, somme géométrique des tensions partielles et déphasée de φ en avant de l'intensité.

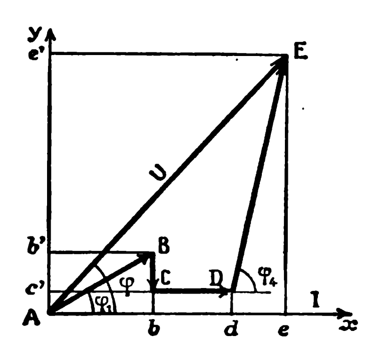


Fig. 3. — *Diagramme vectoriel des tensions* dans le circuit de la figure 2

Projetons le vecteur $\overrightarrow{AE}$ et le contour ABCDE d'une part sur l'axe Ox, d'autre part sur l'axe Ay.

Le vecteur $\overrightarrow{AE}$ représentant U a pour projections la somme des projections des tensions partielles, à condition de considérer la tension en quadrature de la capacité comme négative. Donc :

Dans un ensemble d'appareils* en série, *la tension active totale est la somme des tensions actives partielles, et la tension réactive totale est la somme algébrique des tensions réactives partielles.

Pour l'ensemble, comme pour chaque élément du circuit, la tension aux bornes est la racine carrée de la somme du carré de la tension active et du carré de la tension réactive.

3. Courant watté et courant déwatté.

L'intensité I absorbée par un récepteur possédant à la fois résistance, self et capacité, est déphasée d'un angle φ par rapport à la tension aux bornes de l'appareil. Le vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans la figure 4 représente cette intensité déphasée en avant de la tension[1].

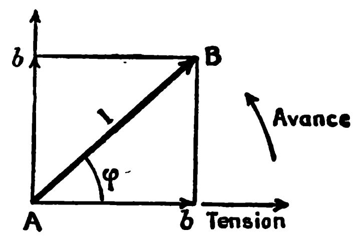


Fig. 4. — L'intensité I se décompose en une intensité wattée Ab = I cos φ et une intensité déwattée Ab' = I sin φ.

On peut considérer le vecteur $\overrightarrow{AB}$

1. Il pourrait être déphasé en arrière de la tension : rien ne serait changé à ce qui suit.

comme résultant de la composition de deux vecteurs perpendiculaires : $\overrightarrow{Ab}$ **= I cos φ en phase avec la tension et Ab′ = I sin φ en quadrature.**

On donne à $\overrightarrow{Ab}$ **= I cos φ le nom de courant** *actif* **ou** *watté* **parce que c'est l'un des facteurs qui intervient dans la formule P = UI cos φ de la puissance du récepteur.**

$\overrightarrow{Ab'}$ **= I sin φ se nomme courant** ***réactif*** **ou** ***déwatté.***

Puisque $\overline{AB}^2 = \overline{Ab}^2 + \overline{Ab'}^2$**, le courant total est égal à la racine carrée de la somme des carrés du courant watté et du courant déwatté.**

4. Dans un circuit formé de plusieurs *récepteurs en dérivation*, les intensités wattées s'ajoutent et il en est de même des intensités déwattées.

Soit un circuit constitué par plusieurs récepteurs montés en parallèle (fig. 5) :

I est une bobine réelle,
II une capacité pure,
III une résistance pure,
IV une bobine réelle.

Une tension alternative U produit dans le circuit une *intensité totale* I *somme géométrique* des intensités partielles I_1, I_2, I_3, I_4.

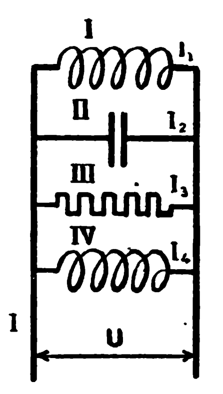


Fig. 5. — Circuit composé de quatre récepteurs en parallèle.

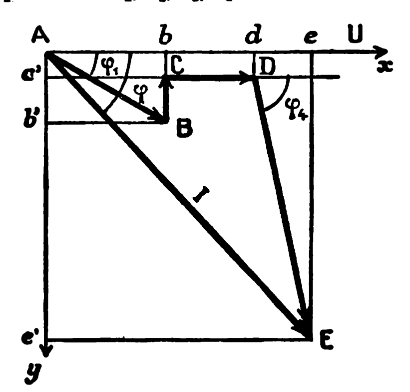


Fig. 6. — *Diagramme vectoriel des intensités* dans le circuit de la figure 5.

Construisons (fig. 6) le diagramme vectoriel des intensités en choisissant comme origine des phases la phase de la tension U qui est commune à tous les appareils.

I_1 **déphasée de** φ_1 **en arrière de U, est représentée par le vecteur** $\overrightarrow{AB}$**;**

I_2**, en avance de** $\frac{\pi}{2}$ **sur la tension, par** $\overrightarrow{BC}$**;**

I_3, en phase avec U, par $\overrightarrow{CD}$;

I_4, en arrière de φ_4, par $\overrightarrow{DE}$.

L'intensité totale I est représentée par $\overrightarrow{AE}$, somme géométrique des intensités partielles et déphasée de l'angle φ en arrière de la tension.

Projetons le vecteur $\overrightarrow{AE}$ et le contour ABCDE successivement sur Ax et sur Ay.

Le vecteur résultant $\overrightarrow{AE}$ qui représente I a pour composantes la somme des courants wattés et la somme des courants déwattés, à condition de considérer le courant déwatté de la capacité comme négatif. Donc :

Dans un ensemble de récepteurs en dérivation, le courant watté total est la somme des courants wattés partiels et le courant déwatté total est la somme algébrique des courants déwattés partiels.

Pour l'ensemble, comme pour chaque élément du circuit, l'intensité est la racine carrée de la somme du carré de l'intensité wattée et du carré de l'intensité déwattée.

5. Puissance active et puissance réactive.

a) ***Récepteurs en série.***

Dans la figure 3, multiplions chaque vecteur et ses projections par I, ce qui revient à conserver le même diagramme, mais à en changer l'échelle. Chaque vecteur représente alors la *puissance apparente* U_1I, U_2I, etc., de l'élément récepteur correspondant.

Chaque puissance apparente est la somme géométrique de deux composantes : l'une, en phase avec l'intensité, se nomme *puissance réelle*, ou *active*, ou *wattée;* l'autre, en quadrature, est la *puissance réactive* ou *déwattée* (fig. 7).

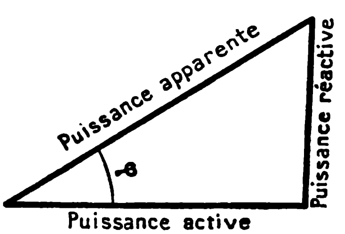


Fig. 7. — La puissance apparente d'un récepteur (ou de toute une installation) peut être représentée comme l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont les côtés de l'angle droit sont la puissance active et la puissance réactive.

La puissance apparente totale de l'ensemble P_a, a pour composantes perpendiculaires, d'une part, la somme P des puissances actives, d'autre part, la somme P_r des puissances réactives, en considérant comme négative la puissance réactive dans la capacité, et nous avons :

$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2}.$$

b) ***Récepteurs en dérivation.***

Dans la figure 6, multiplions chaque vecteur et ses projections par U. Chaque vecteur représente la puissance apparente dans l'élément de circuit correspondant, et ses projections figurent la puissance active et la puissance réactive qui la composent.

La puissance apparente P_a de l'ensemble a encore pour composantes la somme P des puissances actives du circuit et la somme algébrique P_r des puissances réactives.

La décomposition de la puissance apparente en puissance active et puissance réactive convient donc pour des récepteurs en série et pour des récepteurs en dérivation; nous pourrions, en procédant comme nous l'avons fait, montrer qu'elle s'applique aussi à des générateurs en série ou en parallèle : c'est une propriété générale.

c) En somme, les éléments constitutifs d'un *circuit récepteur* à courant alternatif sont :

1° des *résistances pures* qui absorbent seulement une puissance active RI^2,

2° des *inductances pures* qui n'absorbent qu'une puissance réactive, $L\omega I^2$,

3° des *capacités* dont la puissance réactive est négative $-\frac{I^2}{C\omega}$.

Dans son ensemble, un réseau à courant alternatif distribue simultanément de la puissance active P et de la puissance réactive P_r.

La puissance active totale P du réseau est la somme des puissances actives qu'absorbent tous les récepteurs; la puissance réactive totale P_r du réseau est la somme algébrique des puissances réactives qu'absorbent tous les récepteurs. La puissance apparente du réseau est la racine carrée de la somme du carré de la puissance active et du carré de la puissance réactive.

On peut considérer le réseau alternatif comme la superposition d'un réseau à puissance active et d'un réseau à puissance réactive[1].

5. Unités de puissance.

L'unité de puissance active ($P = UI\cos\varphi$) est le *watt* (*W*), avec pour multiple usuel le *kilowatt* (*kW*).

La puissance apparente (UI) s'évalue en *volts-ampères* (*VA*); cette unité a pour multiple usuel le *kilo-volt-ampère* (*kVA*).

L'unité de puissance réactive ($P_r = UI\sin\varphi$) est le *volt-ampère-réactif* (*VAr*), avec pour multiple le *kilo-volt-ampère-réactif* (*kVAr*), en abrégé kilovar.

Des relations :

$$P_a = UI$$
$$P = UI\cos\varphi$$
$$P_r = UI\sin\varphi$$
$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2}$$

on tire

$$\cos\varphi = \frac{P}{P_a}.$$

1. Ce théorème de la conservation de la puissance active d'une part, de la puissance réactive d'autre part, se nomme « *Théorème de Boucherot* », M. Boucherot est un ingénieur électricien français contemporain.

ou :

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} \qquad \sin\varphi = \frac{P_r}{\sqrt{P^2 + P_r^2}}$$

6. Mesure de puissances.

Nous savons que la puissance active P se mesure directement avec un wattmètre.

La puissance apparente P_a s'évalue en mesurant U et I et en calculant le produit UI.

Connaissant la puissance active et la puissance apparente, on peut calculer la puissance réactive et le $\cos\varphi$. D'ailleurs, on construit des wattmètres spéciaux pour la mesure directe des puissances réactives et aussi des phasemètres pour la mesure directe du $\cos\varphi$ (page 423, § 2).

7. Énergie active et énergie réactive.

A la puissance d'une installation ou d'un appareil correspond l'énergie produite ou consommée en un certain temps.

A la puissance active correspond l'énergie active *W*, évaluée en watts-heures (*Wh*) ou en kilowatts-heures (*kWh*); à la puissance réactive, correspond l'énergie réactive *Wr*, évaluée en var-heures (*VAr-h*) ou en kilovars-heures (*kVAr-h*).

Certaines installations électriques sont pourvues d'un compteur d'énergie active et d'un compteur d'énergie réactive.

La formule

$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_r^2}}$$

donne la valeur moyenne du facteur de puissance pendant le temps d'utilisation de l'énergie *W*.

Résumé.

Dans un circuit à courant alternatif, on peut avoir à évaluer les grandeurs suivantes :

la tension efficace	U	qui s'exprime	en volts,
l'intensité efficace	I	—	en ampères,
la tension active	$U \cos\varphi$	—	en volts,
la tension réactive	$U \sin\varphi$	—	en volts réactifs,
le courant watté	$I \cos\varphi$	—	en ampères,
le courant déwatté	$I \sin\varphi$	—	en ampères réactifs
la puissance apparente	$P_a = UI$	—	en volts-ampères,
la puissance active	$P = UI \cos\varphi$	—	en watts,
la puissance réactive	$P_r = UI \sin\varphi$	—	en vars,
le facteur de puissance	ou $\cos\varphi$, nombre abstrait		compris entre 0 et 1.
l'énergie active	$W = UIT \cos\varphi$	—	en kilowatts-heures
l'énergie réactive	$W_r = UIT \sin\varphi$	—	en kilovars-heures.

Exercices.

1. Pour contrôler une installation d'abonné, on mesure la tension et l'intensité du courant qui lui est fourni et la puissance qu'elle consomme. On trouve

U = 110 volts, 1 = 80 ampères, P = 6 kilowatts.

1° Quel est le cos φ de l'installation?
2° Quelle est la puissance réactive absorbée?

2. A l'entrée de la ligne de transport d'énergie chez un petit industriel, on mesure :

U = 115 volts, 1 = 66 ampères, cos φ = 0,78.

Calculer la puissance apparente, la puissance active, la puissance réactive de l'installation.

3. La consommation mensuelle relevée aux compteurs d'un abonné a été 2 840 *kWh* et 1 750 *kV Ar-h.*
Calculer le cos φ moyen, pendant le mois écoulé, de l'installation de cet abonné.

4. Un récepteur alimenté sous 220 *V* absorbe 16 A et son facteur de puissance est 0,80. Calculer :

1° la tension active aux bornes du récepteur,
2° la tension réactive,
3° l'intensité active absorbée,
4° l'intensité réactive,
5° la puissance apparente consommée,
6° la puissance active,
7° la puissance réactive.

5. La puissance active absorbée par un moteur monophasé à différentes charges et son facteur de puissance correspondant sont :

P	400	628	700	845	1 040 *W*
cos φ	0,67	0,80	0,82	0,85	0,88

Calculer la puissance réactive absorbée dans chaque cas et construire la courbe de cette puissance en fonction de la puissance active absorbée.

Indications sur la solution. — En divisant membre à membre les deux relations

$$P_r = UI \sin\varphi \qquad \text{et} \qquad P = UI \cos\varphi$$

on trouve $P_r = P \operatorname{tg}\varphi$.

Pour obtenir tg φ en partant de cos φ, on peut employer l'un des trois procédés suivants :

1° avec une table des rapports trigonométriques naturels, connaissant cos φ, on détermine φ, puis dans la table des tangentes tg φ;

2° ou bien on calcule successivement $\cos^2\varphi$, $1 - \cos^2\varphi = \sin^2\varphi$, sin φ et $\operatorname{tg}\varphi = \sin\varphi : \cos\varphi$;

3° ou encore, on applique la formule : $\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{\dfrac{1 - \cos^2\varphi}{\cos^2\varphi}}$

La courbe obtenue est sensiblement une droite. Elle montre que la puissance réactive absorbée croît lentement avec la charge. Cette puissance réactive est une puissance magnétisante, elle croît parce que les fuites magnétiques augmentent quand le courant induit dans le rotor grandit.

Importance industrielle du facteur de puissance.

I. La valeur du facteur de puissance d'une installation électrique intéresse qui : le consommateur ou le fournisseur d'énergie électrique?

Le consommateur désire alimenter des lampes, faire tourner des moteurs; il demande à son installation l'énergie électrique dont il a besoin pour la transformer en énergie calorifique ou mécanique. C'est de l'*énergie active* qu'il entend acheter, puisque *c'est de l'énergie active qu'il consomme.*

Mais si le $\cos \varphi$ de l'installation réceptrice est faible, le fournisseur d'énergie électrique devra livrer une puissance apparente plus grande que la puissance active utilisée. Par exemple, 1 *kW* exige 1 110 *VA* quand $\cos \varphi = 0{,}90$ et 1 666 *VA* quand $\cos \varphi = 0{,}6$. *Puisque la distribution se fait à tension constante, l'intensité du courant livré pour une puissance active donnée est inversement proportionnelle au facteur de puissance;* il faut 10 ampères sous 110 volts pour obtenir 1 kilowatt avec $\cos \varphi = 0{,}90$, et 15 ampères sous 110 volts pour 1 kilowatt quand $\cos \varphi = 0{,}6$.

D'une part, les pertes en chaleur Joule dans la ligne d'amenée du courant, pertes que supporte le fournisseur, sont plus importantes. D'autre part, les machines génératrices pour débiter un courant plus intense doivent être plus largement dimensionnées, par suite plus coûteuses. ***Il est donc avantageux, pour le fournisseur, que l'installation du consommateur ait un facteur de puissance élevé.***

Le fournisseur pousse son client à réaliser un bon $\cos \varphi$ par des stipulations insérées dans le contrat de fourniture d'énergie électrique. Le prix de base du kilowatt-heure est fixé, en général, pour un facteur de puissance compris entre 0,80 et 0,90. Une bonification est accordée au client si le $\cos \varphi$ de son installation dépasse 0,90; une pénalité, sous forme de supplément à payer, lui est appliquée quand le $\cos \varphi$ est inférieur à 0,80; la fourniture de courant peut même être refusée si le $\cos \varphi$ est trop faible.

Un facteur de puissance faible présente encore pour le consommateur d'autres inconvénients :

augmentation du prix de son transformateur, de l'appareillage et des lignes;

augmentation des chutes de tension dans les lignes de son installation;

augmentation des pertes dans les transformateurs et les lignes.

Le problème qui suit précisera l'importance du facteur de puissance; il montrera aussi comment les notions de puissance active et de puissance réactive facilitent les calculs.

2. Exemple de calcul de puissances actives et réactives.

Une installation à courant alternatif, tension 110 *V, fréquence* 50 *p/s, comporte* 5 *moteurs de* 4 *ch, de rendement* 0,85, *dont le* $\cos\varphi$ *est* 0,65 *et* 40 *lampes de* 100 *W chacune.*

Elle est alimentée par une ligne à deux fils d'une longueur de 100 *m ayant une section de* 100 *mm*², *soit une résistance totale de* 0,032 Ω, *une inductance de* 0,1 *millihenry et une capacité négligeable.*

Calculer la tension au départ de la ligne.

Nous déterminerons d'abord les puissances actives et réactives absorbées par les moteurs et les lampes et nous calculerons l'intensité à fournir à l'installation.

Nous chercherons ensuite la puissance active et la puissance réactive perdues dans la ligne. De la puissance apparente totale au départ de la ligne, nous tirerons la valeur de la tension nécessaire.

1° **Moteurs.** — Ils absorbent une puissance active de :

$$P = \frac{736 \times 4 \times 5}{0{,}85} = 17\,300\ W$$

donc, une puissance apparente de :

$$P_a = \frac{17\,300}{0{,}65} = 26\,700\ VA$$

et une puissance réactive de :

$$P_r = \sqrt{26\,700^2 - 17\,300^2} = 20\,300\ VAr.$$

2° **Lampes.** — Elles ne consomment que de la puissance active :

$$100 \times 40 = 4\,000\ W.$$

Donc, nous avons le bilan suivant *aux bornes d'entrée de l'installation :*

RÉCEPTEURS	PUISSANCE ACTIVE	PUISSANCE RÉACTIVE
Moteurs	17 300 *W*	20 300 *VAr*
Lampes	4 000 *W*	»
Totaux.	21 300 *W*	20 300 *VAr*

La puissance apparente est alors :

$$P_a = \sqrt{21\,300^2 + 20\,300^2} = 29\,400\ VA.$$

Sous une tension de 110 V, l'intensité atteint :

$$\frac{29\,400}{110} = 267\ A.$$

[Ajoutons que le facteur de puissance est $\frac{P}{P_a} = \frac{21\,300}{29\,400} = 0{,}72.$]

3° Ligne. — A cause de la résistance ohmique, il se dissipe en chaleur par effet Joule dans la ligne une puissance p :

$$p = RI^2 = 0{,}032 \times 267^2 = 2\,280\ W.$$

A cause de l'inductance, intervient dans la ligne une puissance réactive $p_2 = L\omega I^2$ de :

$$p_2 = 0{,}000\,1 \times 314 \times 267^2 = 2\,240\ VAr.$$

Au départ de la ligne, nous avons donc :

	PUISSANCE ACTIVE	PUISSANCE RÉACTIVE
A l'arrivée de la ligne. . .	21 300 *W*	20 300 *VAr*
En ligne	2 280 *W*	2 240 *VAr*
Au départ de la ligne . . .	23 600 *W*	22 540 *VAr*

soit une puissance apparente totale de :

$$P_a = \sqrt{23\,600^2 + 22\,540^2} = 32\,600\ VA.$$

Puisque l'intensité est 267 A, la tension au départ doit être :

$$\frac{32\,600}{267} = 122\ V.$$

3. Amélioration du facteur de puissance d'une installation.

Quand le facteur de puissance d'une installation est faible, c'est parce que la puissance réactive fournie au circuit est importante.

On peut accroître le facteur de puissance en plaçant dans l'installation un appareil producteur de puissance réactive *négative*, par exemple, des condensateurs, ou un moteur synchrone surexcité, ou un moteur asynchrone synchronisé.

La solution idéale consisterait à produire la puissance réactive négative à l'endroit même où elle est absorbée, c'est-à-dire à installer aux bornes de chaque moteur un condensateur convenablement calculé

pour obtenir le facteur de puissance désiré (fig. 1). Les pertes en lignes et les chutes de tensions sont, dans ces conditions, réduites au minimum et le facteur de puissance reste sensiblement constant quelle que

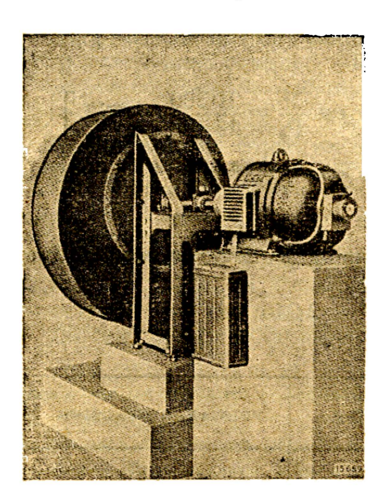


Fig. 1. — ***Condensateur*** de 3 *kVAr* relevant le cos φ d'un moteur de 20 *ch*, 500 *V*, 50 *p/s*.

Ce moteur commande le ventilateur que l'on voit à gauche.

Le condensateur est fixé contre le support du moteur.

soit la charge de l'installation.

Cette solution devient trop coûteuse lorsque les moteurs ne sont pas, chaque jour de travail, utilisés constamment. On a alors intérêt, en vue de réduire les frais de première installation, à compenser, non plus les moteurs séparément, mais des groupes de moteurs, ou même l'ensemble de l'installation. On réalise ainsi la *compensation centralisée* (fig. 2).

La figure 3 donne les schémas de branchement de condensateurs sur réseau triphasé, installés pour compensation locale et pour compensation centralisée.

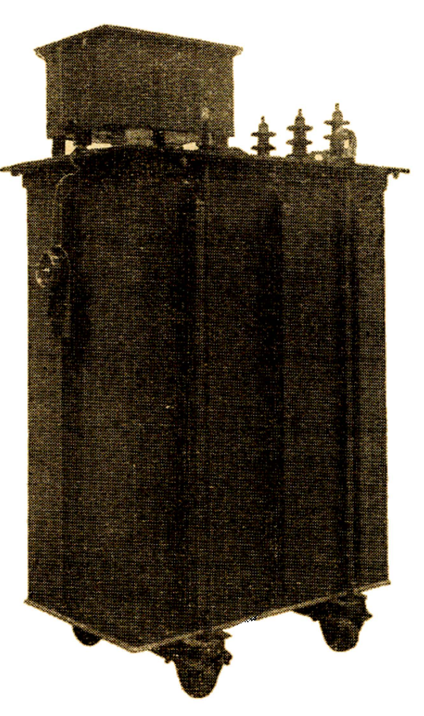


Fig. 2. — ***Condensateur triphasé*** de 350 *kVAr*, 15 000 *V*, 50 *p/s*, destiné à la compensation d'une installation.

On remarquera qu'il est destiné à être installé sur la haute tension (15 000 *V*).

On voit la cuve dans laquelle le condensateur est noyé dans l'huile; en haut, une cuve plus petite, appelée *conservateur d'huile*, communique avec la cuve principale, ce qui permet de maintenir celle-ci constamment pleine; un *niveau d'huile* est visible sur le côté gauche du conservateur.

En haut, les trois bornes correspondant aux trois bornes de trois condensateurs montés en triangle.

A gauche, contre la cuve principale, un *thermomètre* à cadran indique la température de l'huile.

La cuve est mise à la terre.

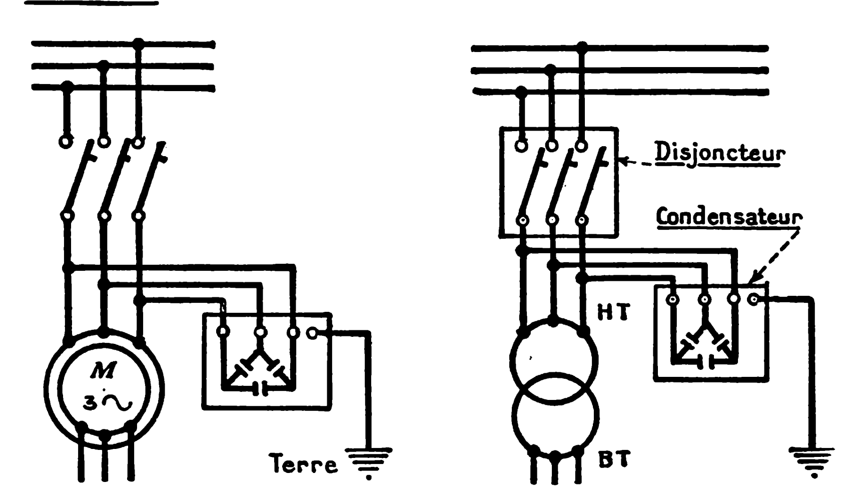


Fig. 3. — Schéma de branchement de condensateurs sur réseau triphasé.
A gauche, branchement sur un réseau basse tension aux bornes d'un moteur (compensation locale).
A droite, branchement sur un réseau haute tension aux bornes d'un transformateur (compensation centralisée).
Le disjoncteur, appareil de sécurité, peut être remplacé par des fusibles. La cuve de chaque condensateur est mise à terre.

4. Calcul de la capacité du condensateur nécessaire pour relever le facteur de puissance d'une installation.

a) La puissance réactive fournie par un condensateur de C farads absorbant I ampères avec U volts à ses bornes est (en valeur absolue) :

$$P_r = UI \; VAr.$$

Or :

$$I = UC\omega \quad \text{ou} \quad U = \frac{I}{C\omega},$$

donc :

$$P_r = U^2C\omega = \frac{I^2}{C\omega} \; VAr.$$

b) Proposons-nous de relever de 0,72 à 0,82 le cos φ de l'installation dont il a été question dans le paragraphe précédent.

A $\cos\varphi = 0{,}72$ correspond $\sin\varphi = 0{,}69$,

A $\cos\varphi' = 0{,}82$ correspond $\sin\varphi' = 0{,}57$.

Fig. 4. — Représentation graphique des puissances mises en jeu dans l'installation avant et après compensation.

La puissance active de l'installation est la même dans les deux cas (fig. 4) :

$$P = 21\,300\ W.$$

Pour $\cos\varphi = 0{,}72$, la puissance apparente est :

$$P_a = \frac{21\,300}{0{,}72} = 29\,600\ VA$$

et la puissance réactive :

$$P_r = \frac{21\,300 \times 0{,}69}{0{,}72} = 20\,300\ VAr.$$

Pour $\cos\varphi' = 0{,}82$, la puissance apparente devient :

$$P'_a = \frac{21\,300}{0{,}82} = 26\,000\ VA$$

et la puissance réactive :

$$P'_r = \frac{21\,300 \times 0{,}57}{0{,}82} = 15\,000\ VAr.$$

Pour produire le relèvement du facteur de puissance de 0,72 à 0,82, le condensateur devra fournir, en valeur absolue :

$$P_r - P'_r = 20\,300 - 15\,000 = 5\,300\ VAr.$$

Puisque la puissance réactive d'un condensateur est $U^2C\omega$, pour obtenir 5 300 *VAr* sous 110 *V*, il faudra une capacité C telle que :

$$U^2C\omega = 5\,300 \qquad (U = 110 \qquad \omega = 314).$$

D'où :

$$C = \frac{53\,00}{110^2 \times 314} = \frac{1\,400}{10^6}\ \text{farads}$$

soit : 1 400 μF.

L'économie annuelle réalisée par cette amélioration du $\cos\varphi$ de l'installation couvrirait-elle l'intérêt du prix d'achat du condensateur et son amortissement? C'est la question que se posera le consommateur d'électricité avant de prendre une décision.

Exercices.

1. — Une installation à *courant continu*, tension 110 V, comprend 5 moteurs de 4 *ch* de rendement 0,85 et 40 lampes de 100 watts chacune.

Elle est alimentée par une ligne à deux fils d'une longueur de 100 *m* dont la résistance totale est 0,032 Ω.

Calculer la tension nécessaire au départ de la ligne.

On comparera le résultat trouvé à celui du problème traité dans la leçon ci-dessus.

2. Une petite installation est alimentée par une ligne monophasée de résistance 0,075 Ω, de réactance inductive 0,05 Ω, et de capacité négligeable.

Elle comporte 60 lampes de 100 *W*, 1 moteur de 10 *ch* (rendement 0,80, cos φ = 0,74) et 1 moteur de 20 *ch* (rendement 0,82, cos φ = 0,76); tous ces récepteurs fonctionnent sous une tension de 220 volts.

1° Quelle est l'intensité à pleine charge?

2° Quelle est le cos φ de l'installation à pleine charge?

3° Quelle est la puissance réactive et la capacité du condensateur susceptible de relever jusqu'à 0,80 le cos φ du premier moteur? Même question pour le second moteur?

4° Ayant mis en place ces deux condensateurs, quel est le cos φ de l'installation à pleine charge.

5° Quelle doit être la tension au départ de la ligne?

a) avant la mise en place des condensateurs;

b) après leur mise en place.

3. Pour un consommateur d'énergie électrique qui utilise en moyenne 20 *kW* pendant 1 500 heures par an, le tarif de vente est ainsi composé :

1° d'une prime fixe annuelle de 250 francs par *kW* de puissance souscrite[1];

2° une taxe proportionnelle par kilowatt-heure effectivement consommé de 0,40 franc.

Ces prix s'entendent pour un facteur de puissance compris entre 0,80 et 0,90.

Si le facteur de puissance est inférieur à 0,80, la prime fixe est augmentée dans le rapport de 0,85 à cos φ et la taxe proportionnelle est augmentée :

de 0,20 pour 100 par centième de cos φ compris entre 0,80 et 0,75;

de 0,35 pour 100 par centième de cos φ compris entre 0,75 et 0,70;

de 0,60 pour 100 par centième de cos φ compris entre 0,70 et 0,60.

de 0,90 pour 100 par centième de cos φ au-dessous de 0,60.

La puissance souscrite par le consommateur est 25 *kW*. Le facteur de puissance de son installation est 0,68.

1° Calculer la somme à payer pour une année au fournisseur d'énergie électrique.

2° Calculer la somme qui serait à payer pour une année si le cos φ de l'installation était élevé à 0,82.

1. Par puissance souscrite, on entend la puissance maximum que le fournisseur s'engage à fournir au client dans la police d'abonnement.

Quelques combinaisons d'éléments de circuits électriques.

Avec des champs magnétiques, des résistances, des selfs, des capacités, des cadres mobiles, on réalise des dispositifs dont les propriétés sont parfois curieuses. Nous allons en signaler quelques-uns.

I. Des appareils de mesure électriques effectuent les quatre opérations arithmétiques.

Dans le champ fixe d'un aimant, un cadre mobile, rappelé par des spiraux ou des fils métalliques tordus, dévie quand il est parcouru par un courant et sa position d'équilibre dépend de l'intensité du courant dans le cadre : c'est un galvanomètre.

Le cadre mobile peut être fait de deux bobines accolées. Si ces bobines sont parcourues dans le même sens par des intensités i et i', la déviation du cadre est fonction de la ***somme*** $i + i'$.

Si les deux courants sont de sens contraires, la déviation du cadre est fonction de la ***différence*** $i - i'$. Le galvanomètre est dit ***différentiel.***

Les appareils électrodynamiques, tels que les wattmètres, comportent une bobine fixe traversée par un courant I et, dans le champ de la bobine fixe, une bobine mobile, rappelée par des spiraux, et parcourue par un courant i. La déviation du cadre est fonction du ***produit*** $I \times i$.

Rappelons le principe des logomètres[1] ou quotient-mètres dont les ohmmètres sont une application.

Deux cadres mobiles A et B sont montés à 90° sur le même axe. Un courant est amené à chaque cadre par des fils très souples qui ne s'opposent pas à la déviation de l'ensemble. Le système mobile n'est pas muni de spiraux et aucun couple mécanique ne s'oppose à son mouvement. Les deux cadres sont placés dans le champ d'un aimant, d'un électro-aimant ou d'une bobine.

Quand un courant d'intensité i traverse le cadre A, il y produit un champ H proportionnel à i et normal au plan du cadre. De même un courant d'intensité i', dans le cadre B, y produit un champ H' qui lui est proportionnel et qui est normal au plan de B. Les deux champs se composent et le champ résultant fait avec le cadre A un angle α tel que :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{H'}.$$

L'angle α dépend donc du ***quotient*** $\frac{i}{i'}$ (fig. 1).

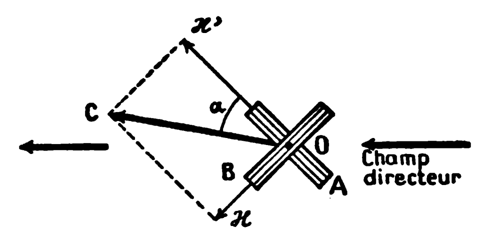


Fig. 1. — Principe du logomètre : les deux cadres en croix s'orientent pour mettre leur champ résultant OC dans la direction et le sens du champ directeur.

1. Le mot grec *logos* signifie rapport.

L'ensemble des bobines s'oriente dans le champ directeur de l'appareil pour que le champ directeur et le champ résultant OC aient même direction et même sens.

L'équipage mobile est muni d'une aiguille dont la position, sur un cadran gradué repère les différentes valeurs du rapport $\frac{i}{i'}$.

2. Principe de quelques appareils de mesure pour courant alternatif.

Nous savons qu'un courant alternatif dans une *résistance* pure est en phase avec la tension; dans une *self* pure, il est déphasé de $\pi : 2$ en arrière de la tension; dans une *capacité* pure, de $\pi : 2$ en avant de la tension.

En combinant résistances, selfs et capacités avec les dispositifs indiqués au paragraphe précédent on réalise des appareils mesurant l'un ou l'autre des facteurs caractéristiques d'un courant alternatif.

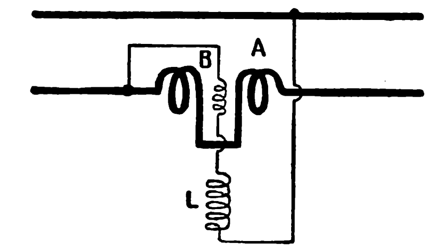


Fig. 2. — Schéma d'un wattmètre pour puissance réactive : A, bobine fixe; B, cadre mobile; L, inductance en série.

a) *Wattmètre pour puissance réactive.*

Nous savons qu'un wattmètre de précision est du type électrodynamique.

Dans un wattmètre pour puissance active, la bobine fixe est parcourue par le courant I qui traverse l'appareil étudié; la bobine mobile, en série avec une grande résistance R, est branchée sur la tension U déphasée de l'angle φ sur l'intensité I. Le wattmètre mesure UI cos φ, c'est-à-dire la puissance active. La déviation de l'aiguille est indépendante de la fréquence du courant.

Si, au lieu d'une grande résistance, on met en série avec la bobine mobile une bobine peu résistante, mais de très grande self, le courant qui a pour valeur $U : L\omega$ est décalé de $\pi : 2$ en arrière de U. Le wattmètre mesure :

$$UI \sin \varphi$$

puissance réactive (fig. 2).

La réactance $L\omega$ dépend de la pulsation du courant. Un wattmètre pour puissance réactive doit être étalonné pour sa fréquence d'emploi.

b) *Phasemètre.*

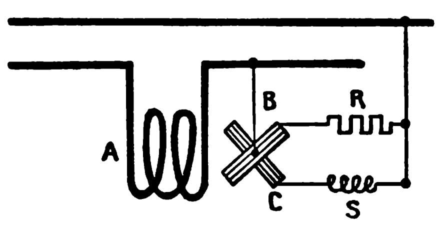


Fig. 3. — Schéma d'un phasemètre. Les bobines B et C constituent un équipage mobile. Le courant dans la bobine C est déphasé de $\pi : 2$ en arrière du courant dans la bobine B.

L'appareil sert à mesurer le dépasage φ entre une intensité et une tension.

C'est un logomètre. A l'intérieur d'une grande bobine fixe A parcourue par le courant I, se trouvent deux cadres en croix B et C montés sur pivots, sans spiraux de rappel. Le cadre B est branché avec une grande résistance R en série entre les fils de ligne. Le cadre C est monté de même, mais avec une bobine S en

série. Le courant dans B est en phase avec la tension U; dans C, il est en quadrature (fig. 3).

La bobine A en agissant sur B produit un couple

$$KUI \cos\varphi.$$

En agissant sur C, elle produit un couple

$$K'UI \sin\varphi.$$

La déviation α du logomètre est telle que :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{K'UI \sin\varphi}{KUI \cos\varphi} = \frac{K'}{K}\operatorname{tg}\varphi.$$

Elle est indépendante de la tension U et de l'intensité I, mais à cause de l'inductance S, l'appareil ne convient que pour la fréquence pour laquelle il a été étalonné.

Sur le cadran du phasemètre, au lieu des valeurs de tg φ, on indique les valeurs de cos φ correspondantes.

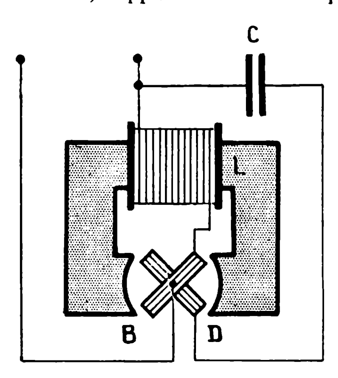


Fig. 4. — Schéma d'un fréquencemètre. Les bobines B et D forment un équipage mobile.

c) ***Fréquencemètre.***

On fabrique des fréquencemètres à aiguille en combinant, de façon différente suivant les constructeurs, des réactances de self et de capacité qui sont des fonctions de la pulsation, c'est-à-dire de la fréquence du courant qui les traverse.

Dans un modèle assez employé, on utilise un logomètre et un électro-aimant à courant alternatif (fig. 4).

L'un des cadres B est en dérivation sur les deux fils de la distribution à courant alternatif avec une forte self L en série; cette self est la bobine de l'électro-aimant. L'intensité dans le cadre B est $\frac{U}{L\omega}$.

L'autre cadre D est en dérivation sur la ligne avec un condensateur C en série : le courant qui le traverse est $UC\omega$.

La déviation α du système mobile est telle que

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{UC\omega}{\frac{U}{L\omega}} = LC\omega^2 = Kf^2$$

elle est fonction de la pulsation et indépendante de la tension. Le cadran de l'appareil est gradué en périodes par seconde.

16. COURANTS POLYPHASÉS

65e LEÇON

Tensions triphasées.

1. Mesurons les tensions qui existent entre les bornes d'arrivée du courant alternatif triphasé dans la salle de cours.

Sur le tableau d'arrivée, se trouvent *quatre* bornes; trois sont marquées I, II et III : ce sont les bornes des *phases;* une quatrième porte l'indication N (*neutre*).

a) Mesurons les tensions entre la borne N et chacune des bornes I, II, III. Nous trouvons :
$V_1 = V_2 = V_3 = 115$ volts

Nous appellerons ces tensions *tensions simples* (fig. 1).

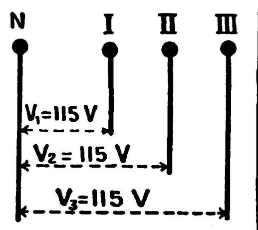


Fig. 1. — Une tension entre neutre et phase est dite *tension simple*.
Les 3 tensions simples sont égales chacune à 115 volts sur notre secteur.

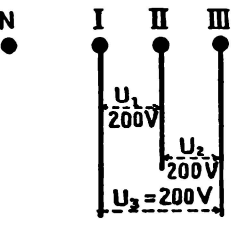


Fig. 2. — Une tension entre deux phases est dite *tension composée*.
Les 3 tensions composées sont égales chacune à 200 volts sur notre secteur.

b) Mesurons les tensions entre bornes I et II, II et III, III et I. Nous trouvons :
$U_1 = U_2 = U_3 = 200$ volts

Nous appellerons ces tensions *tensions composées* (fig. 2).

2. Les tensions simples sont déphasées l'une par rapport à l'autre.

a) En effet :

1° La mesure directe de la tension entre les bornes I et II donne $U_1 = 200$ volts.

2° en prenant comme intermédiaire la borne N, la tension entre I et N est $V_1 = 115$ volts; entre N et II, elle est $V_2 = 115$ volts : la tension totale U_1 n'est ni la somme, ni la différence arithmétique des tensions partielles V_1 et V_2; les tensions V_1 et V_2 ne sont donc pas en phase.

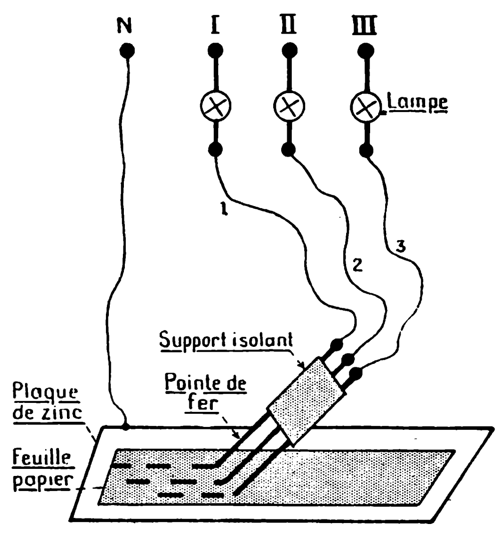


Fig. 3. — Cette expérience montre que les trois tensions simples ne sont pas en phase.

b) Ce déphasage des tensions simples peut être mis en évidence avec du papier **cherche-pôles**[1].

Mouillons une feuille de papier buvard avec une solution de ferrocyanure de potassium et de chlorure de sodium. Plaçons ce papier humide sur une plaque de zinc (fig. 3) reliée par un conducteur à la borne N. Connectons trois pointes de *fer*, montées dans un même support isolant, aux bornes I, II et III (avec une lampe en série dans chaque conducteur pour éviter des courts-circuits). Faisons glisser rapidement les trois pointes sur le papier. Nous obtenons trois lignes formées de tirets bleus (fig. 4).

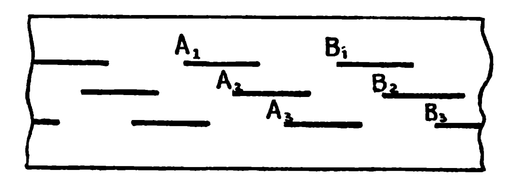


Fig. 4. — A_1B_1 correspond à 1 période de la phase I.
A_2B_2 id 1 id. II.
A_3B_3 id. 1 id. III.
Ces 3 périodes ont même durée; mais elles sont déphasées l'une par rapport à l'autre.

Nous savons que ces traits bleus sont tracés par les pointes de fer pendant qu'elles sont positives. Les lignes obtenues montrent que les trois tensions changent de sens successivement, c'est-à-dire qu'elles sont déphasées chacune par rapport aux deux autres.

1. On peut aussi montrer ce déphasage avec l'oscillographe double de démonstration.

3. Calculons, à l'aide des mesures précédentes, l'angle de déphasage de deux tensions simples.

a) Choisissons un sens dans lequel nous compterons comme positives les tensions instantanées : ce sera, par exemple, le sens de N à I, de N à II, de N à III (fig. 5).

La *tension instantanée* u_1 entre les bornes I et II est telle que (fig. 6) :

$$v_2 = v_1 + u_1.$$

d'où :

$$u_1 = v_2 - v_1.$$

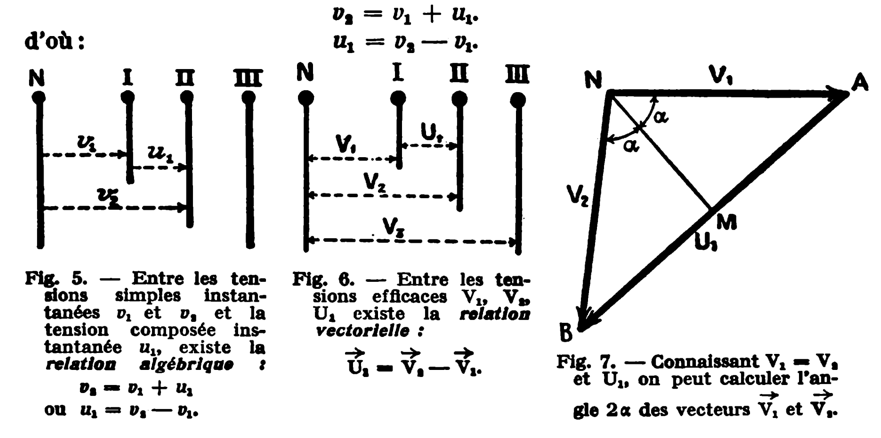


Fig. 5. — Entre les tensions simples instantanées v_1 et v_2 et la tension composée instantanée u_1, existe la ***relation algébrique*** :

$$v_2 = v_1 + u_1$$

ou $u_1 = v_2 - v_1$.

Fig. 6. — Entre les tensions efficaces V_1, V_2, U_1 existe la ***relation vectorielle*** :

$$\vec{U_1} = \vec{V_2} - \vec{V_1}.$$

Fig. 7. — Connaissant $V_1 = V_2$ et U_1, on peut calculer l'angle 2α des vecteurs $\vec{V_1}$ et $\vec{V_2}$.

Il en résulte que, dans la représentation vectorielle, le vecteur représentant la tension efficace U_1 est la *différence géométrique* des vecteurs représentant les tensions efficaces V_2 et V_1 (fig. 6).

b) Figurons V_1 et V_2 par deux vecteurs $\overrightarrow{NA}$ et $\overrightarrow{NB}$ faisant entre eux un angle 2α qu'il s'agit d'évaluer. Le vecteur $\overrightarrow{AB}$ est la différence géométrique de $\overrightarrow{NB}$ et de $\overrightarrow{NA}$ (voir 55ᵉ Leçon, § 4). Il représente U_1 (fig. 7).

Dans le triangle isocèle ANB, $AB = 2AM = 2NA \sin\alpha$. Donc :

$$U_1 = 2V_1 \sin\alpha.$$

En remplaçant U_1 et V_1 par les valeurs numériques mesurées :

$$200 = 2 \times 115 \times \sin\alpha.$$

D'où :

$$\sin\alpha = \frac{200}{2 \times 115} = 0{,}866.$$

L'angle α ayant pour sinus 0,866 vaut 60°. Les deux vecteurs représentant V_1 et V_2 font entre eux un angle de 120° ou $2\pi/3$ radians.

Nous trouverions la même valeur pour l'angle des vecteurs représentant V_2 et V_3 ou V_3 et V_1.

Remarque. — Un déphasage de 2π radians correspond à une période. ***Les trois tensions simples sont donc déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle $2\pi/3$ ou décalées dans le temps d'un tiers de période.***

Leurs valeurs instantanées à l'instant t sont :

$$v_1 = V_m \sin \omega t$$
$$v_2 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$v_3 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Elles sont représentées par les trois vecteurs de la figure 8.

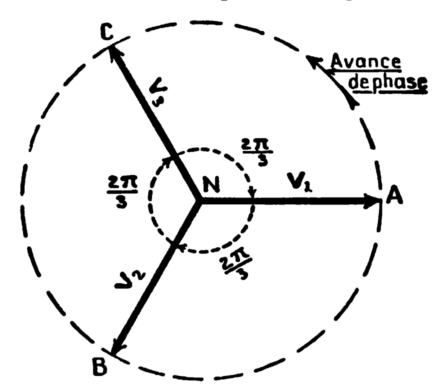


Fig. 8. — Diagramme vectoriel de trois tensions simples triphasées V_1, V_2, V_3.

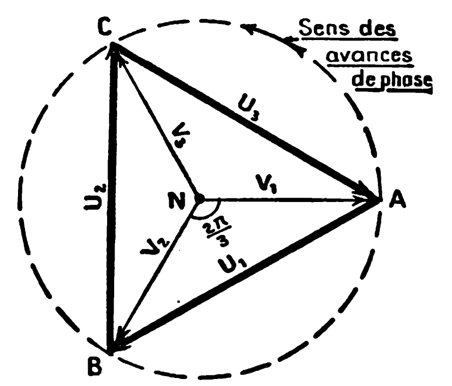


Fig. 9. — Les trois tensions composées U_1, U_2, U_3, sont aussi déphasées l'une par rapport à l'autre de $2\pi/3$.

A l'ensemble de ces ***trois tensions alternatives de même amplitude, de même fréquence, et déphasées l'une par rapport à l'autre de*** **1/3** ***de période,*** **on donne le nom de** ***tensions triphasées.***

4. Les tensions composées sont aussi des tensions triphasées.

Les tensions simples entre les **bornes** N et I, N et II, N et III, sont **représentées dans la figure 9 par les vecteurs** $\overrightarrow{NA}$, $\overrightarrow{NB}$ et $\overrightarrow{NC}$.

Les tensions composées le sont donc par les vecteurs $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{BC}$, $\overrightarrow{CA}$.

En effet : $\overrightarrow{NA} + \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{NB}$ **ou** $\vec{V_1} + \vec{U_1} = \vec{V_2}$ **ou** $\vec{U_1} = \vec{V_2} - \vec{V_1}$

De même : $\vec{U_2} = \vec{V_3} - \vec{V_2}$ **et** $\vec{U_3} = \vec{V_1} - \vec{V_3}$

La figure ABC est un triangle équilatéral : les trois vecteurs ont même longueur. Pour que le vecteur $\overrightarrow{BC}$ **prenne la position de** $\overrightarrow{AB}$, **il faut que la figure tourne autour du point N, dans le sens des avances de phase, d'un angle $2\pi/3$ radians.**

Les trois tensions composées sont donc déphasées l'une par rapport à l'autre d'un tiers de période : ce sont aussi des tensions triphasées.

Remarquons que chacune des tensions composées est en quadrature avec une tension simple; par exemple, U_1 avec V_3.

5. Rapport entre les tensions simples et les tensions composées.

De la figure 9, diagramme des tensions, on tire

$$\boxed{U = V\sqrt{3} = 1{,}732\ V.}$$

Les mesures faites au début de la leçon vérifient cette relation. En effet :

$$200 \simeq 115 \times \sqrt{3}.$$

En résumé, une distribution de courants triphasés avec quatre bornes permet de disposer :

1° d'une tension alternative V, en branchant l'appareil récepteur entre la borne neutre et l'une des bornes de phases;

2° d'une tension alternative $U = V\sqrt{3}$, en branchant le récepteur entre deux bornes de phases;

3° des tensions triphasées V;

4° des tensions triphasées $U = V\sqrt{3}$.

6. Autres systèmes polyphasés : système diphasé, système hexaphasé.

a) Deux *tensions diphasées* ont même amplitude, même fréquence et sont décalées l'une par rapport à l'autre d'un quart de période. Leurs valeurs instantanées sont :

$$v_1 = V_m \sin \omega t$$
$$v_2 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Si l'on donne une borne commune aux deux tensions, elles sont représentées par les vecteurs $\overrightarrow{NB}$ et $\overrightarrow{NA}$ (fig. 10) et entre les bornes des phases existe une tension composée $U = V\sqrt{2}$.

On a cessé d'utiliser des distributions de *tensions diphasées*.

b) Pour l'alimentation des commutatrices et des redresseurs à vapeur de mercure qui transforment des courants alternatifs en courant continu, on emploie souvent des *tensions hexaphasées*.

Un système de tensions hexaphasées se compose de six tensions alternatives de même amplitude et de même fréquence, décalées l'une par rapport à l'autre d'un sixième de période.

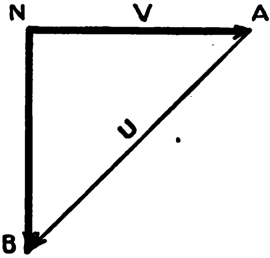


Fig. 10. — Tensions diphasées $U = V\sqrt{2}$.

Leurs valeurs instantanées sont :

$$v_1 = V_m \sin \omega t$$
$$v_2 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right)$$
$$v_3 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$v_4 = V_m \sin(\omega t - \pi)$$
$$v_5 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$
$$v_6 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{3}\right).$$

Si l'on donne une borne commune aux six tensions, elles se représentent par le diagramme de la figure 11.

Remarquons que l'ensemble est constitué par deux systèmes de tensions triphasées décalés l'un par rapport à l'autre d'un sixième de période, ou encore tels que les tensions de l'un soient égales, mais de sens contraire aux tensions de l'autre. C'est pourquoi on obtient facilement, ainsi que nous le verrons dans une leçon ultérieure, des tensions hexaphasées à partir d'un système de tensions triphasées.

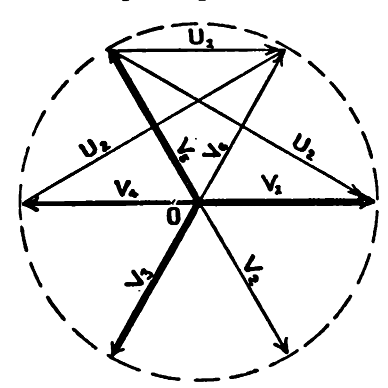


Fig. 11. — Tensions hexaphasées simples V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6 et composées U_1, U_2 ... U.

Aux tensions simples V correspondent des tensions composées telles que U_1 entre deux phases consécutives, ou telles que U_2 entre une phase et la deuxième qui la suit.

c) A une tension alternative prise isolément on donne le nom de *tension monophasée*.

Exercices.

1. Représenter par trois sinusoïdes, tracées avec les mêmes axes de coordonnées, un système de tensions triphasées.

Vérifier que la somme algébrique des trois valeurs instantanées est nulle à un instant quelconque.

Faire la même vérification en se servant d'un diagramme vectoriel.

2. Sur un tableau de distribution, les quatre bornes d'arrivée de tensions triphasées n'ont pas été repérées. Comment peut-on trouver la borne neutre en se servant d'un voltmètre?

3. Quel est le déphasage de la tension composée III sur la tension simple NI (fig. 1).

Courants triphasés.

A. RÉCEPTEURS MONTÉS EN ÉTOILE

I. Expériences.

a) Fabriquons trois récepteurs identiques : par exemple, chacun est obtenu en montant en parallèle 4 lampes de 150 watts à 115 volts.

Branchons chacun de ces récepteurs *entre l'une des bornes de phase et la borne neutre*, de la distribution triphasée (fig. 1). Trois conducteurs AN, BN, CN, aboutissent à la borne neutre; nous pouvons les réunir en un seul (fig. 2) que nous appellerons *fil neutre*, à condition de connecter ensemble les bornes correspondantes des trois récepteurs.

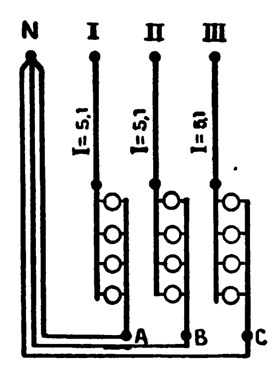


Fig. 1. — Chaque récepteur est monté entre une phase et le point neutre ; 6 fils. Ce montage est dit *en étoile*.

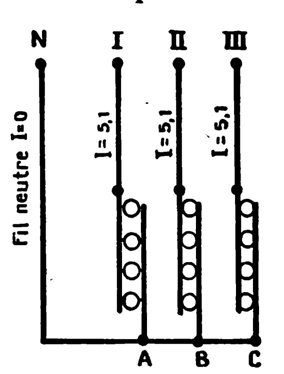


Fig. 2. — Montage à 4 fils : 3 fils de phase et 1 fil neutre. Ce montage est équivalent au précédent.

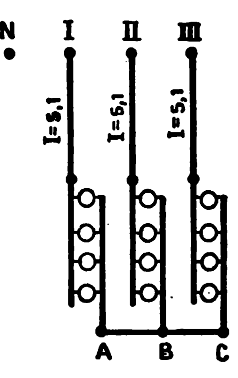


Fig. 3. — Montage avec simplement 3 fils de phase : le fil neutre, inutile ici, est supprimé.

Nous constatons un premier avantage d'une distribution triphasée : la réduction du nombre des fils d'amenée des courants aux récepteurs à quatre au lieu de six, savoir trois fils de phases[1] et un fil neutre.

1. Dans le langage courant, *phase* se dit souvent de l'un quelconque des conducteurs d'un système polyphasé, à l'exception toutefois du conducteur neutre.

On dit que les trois récepteurs, dont trois bornes sont ainsi réunies, sont ***montés en étoile.*** L'ensemble des trois courants produits par les tensions triphasées se nomme ***courants triphasés.***

b) Mesurons l'intensité dans chaque fil de ligne : nous trouvons 5,1 ampères dans chacun.

Mesurons l'intensité dans le fil neutre : *elle est nulle.*

Puisque aucun courant ne passe dans le fil neutre, supprimons ce fil : le fonctionnement des lampes n'est pas modifié. *La distribution de trois courants triphasés peut se faire avec trois fils,* au lieu des six que nous avions employés d'abord (fig. 3 et 4).

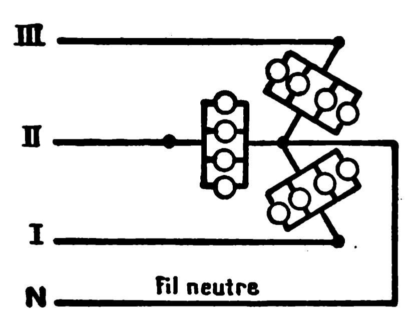


Fig. 4. — Ce schéma est souvent employé pour représenter le montage de trois groupes de lampes *en étoile* avec fil neutre.

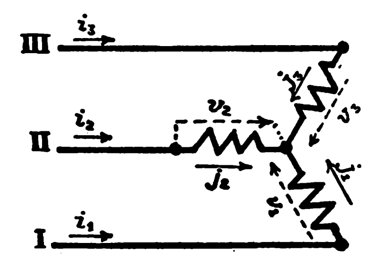


Fig. 5. — Montage en *étoile*, sans fil neutre. — Les flèches indiquent le *sens choisi comme positif* pour chaque courant et pour chaque tension simple, mais non le sens des courants et des tensions à un instant donné. Les trois courants n'ont jamais, à la fois, le sens indiqué. Les trois tensions non plus n'ont jamais à la fois le sens indiqué.

2. Le diagramme vectoriel des trois courants triphasés explique les faits constatés.

a) Supposons d'abord que les récepteurs soient des résistances pures. Dans chacun d'eux, l'intensité du courant est en phase avec la tension aux bornes. Les valeurs instantanées au temps t de ces intensités sont donc (fig. 5) :

$$j_1 = J_m \sin \omega t$$

$$j_2 = J_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$j_3 = J_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Le diagramme vectoriel de la figure 6 les représente.

Construisons la somme géométrique de deux de ces intensités, $\vec{J}_1$ et $\vec{J}_2$ par exemple. La figure 7 montre que cette somme est *égale* et *opposée* à $\vec{J}_3$; donc $\vec{J}_1 + \vec{J}_2 = -\vec{J}_3$ ou $\vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 = 0$.

Par suite, la somme des trois intensités instantanées $j_1 + j_2 + j_3$ est constamment nulle et le fil neutre est inutile.

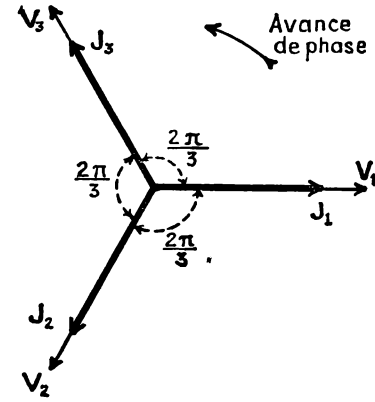


Fig. 6. — Diagramme des intensités étoilées en phase avec les tensions.

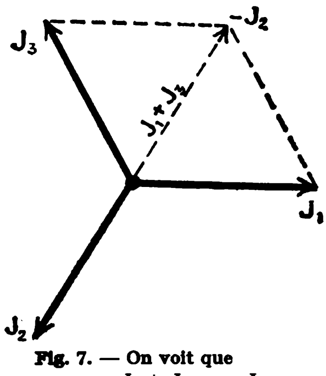


Fig. 7. — On voit que $J_1 + J_2 = -J_3$ donc : $J_1 + J_2 + J_3 = 0$ ou (fig. 5) $j_1 + j_2 + j_3 = 0$.

b) Notre conclusion serait la même si, au lieu de trois résistances pures égales, nous avions employé trois récepteurs inductifs identiques ayant par conséquent même impédance et même cos φ. Les valeurs instantanées des intensités seraient :

$$j_1 = J_m \sin(\omega t - \varphi)$$

$$j_2 = J_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$j_3 = J_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right).$$

La figure 8 est le diagramme correspondant des intensités et des tensions.

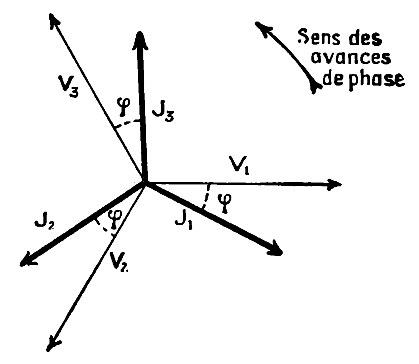


Fig. 8. — Diagramme d'intensités étoilées déphasées de φ en arrière des tensions simples correspondantes.

c) Dans les deux cas que nous venons d'examiner où les trois récepteurs sont identiques, on dit que les trois phases ou les trois ponts de l'installation sont ***équilibrés***.

3. Cas de phases déséquilibrées : expériences.

a) Rétablissons le fil neutre et déséquilibrons les phases en ne laissant qu'une lampe dans la phase III (fig. 9).

Les intensités mesurées sont :

J_1 = 5,1 ampères, J_2 = 5,1 ampères, J_3 = 1,3 ampère.

Dans le fil neutre, l'intensité atteint 3,8 ampères : ce fil n'est plus inutile.

b) Supprimons-le (fig. 10). L'éclat des lampes dans les phases I et II diminue, celui de la lampe de la phase III augmente. La tension aux bornes des trois groupes de lampes n'est plus la même : le fonctionnement de notre installation est défectueux.

c) Supprimons la lampe qui restait dans la phase III (fig. 11). La brillance des lampes des phases I et II diminue encore. Nous avons en effet deux groupes de lampes prévues pour 115 volts montés en série sur 200 volts.

Rétablissons le fil neutre : le fonctionnement des deux groupes de lampes redevient normal.

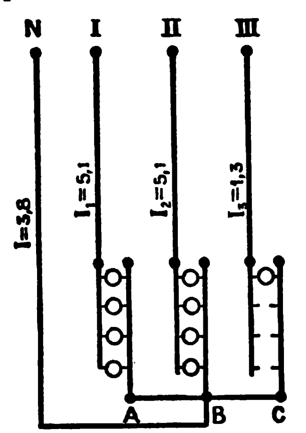


Fig. 9. — Les phases sont déséquilibrées. Le fil neutre est le siège d'un courant : il n'est plus inutile.

Donc, ***le fil neutre, inutile quand les circuits sont équilibrés, est nécessaire quand il y a déséquilibre : il assure pratiquement l'indépendance des trois phases.***

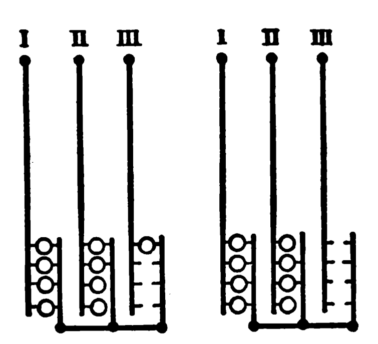


Fig. 10 et 11. — Lorsque les phases sont déséquilibrées et le fil neutre supprimé, le fonction nement des lampes est défectueux : elles ne brillent plus de leur éclat normal.

REMARQUE. — Quand on effectue une installation triphasée, on répartit les appareils récepteurs dans les trois phases pour réaliser l'équilibre quand les appareils sont tous en service. Mais l'usager ne peut s'astreindre à se servir simultanément du même nombre de récepteurs identiques

dans les trois phases. Le déséquilibre d'un montage en étoile est habituel, aussi le maintien du fil neutre est-il de règle; toutefois on lui donne une section inférieure aux trois conducteurs de phases, et il est généralement mis au sol.

Pour simplifier notre étude, nous supposerons toujours les circuits triphasés équilibrés.

4. Puissance consommée dans l'ensemble de trois récepteurs montés en étoile.

Soient : U la tension entre deux fils de ligne, I l'intensité dans chaque ligne.

Désignons par V la tension aux bornes, J l'intensité, $\cos\varphi$ le facteur de puissance *de chaque récepteur* (fig. 12).

La puissance consommée par un récepteur est

$$VJ\cos\varphi$$

celle qui est absorbée par les trois récepteurs identiques est

$$P = 3VJ\cos\varphi.$$

Fig. 12. — La puissance consommée dans un récepteur triphasé équilibré monté en étoile est $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$.

Mais V, tension simple, et U, tension composée, sont liées par la relation $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$; J l'intensité dans une branche de l'étoile et I l'intensité en ligne sont égales.

Donc
$$P = 3\frac{U}{\sqrt{3}}I\cos\varphi$$

et
$$\boxed{P = UI\sqrt{3}\cos\varphi} \qquad (1)$$

On remarquera que φ n'est pas le déphasage entre U et I, mais le déphasage dans chaque branche de l'étoile entre l'intensité J et la tension simple V.

B. RÉCEPTEURS MONTÉS EN TRIANGLE

5. Expériences.

Modifions les récepteurs employés dans la première partie de la leçon en remplaçant les lampes 150 watts, 115 volts, par des lampes 150 watts, 200 ou 220 volts.

a) Montons chaque récepteur *entre deux bornes de phases*. A chaque borne de phase aboutissent deux conducteurs (fig. 13); nous pouvons en supprimer un en réunissant les deux bornes correspondantes des récepteurs (fig. 14).

On dit que ces récepteurs sont montés en *triangle*. La distribution en triangle ne comporte que trois fils. On la représente souvent par le schéma de la figure 15.

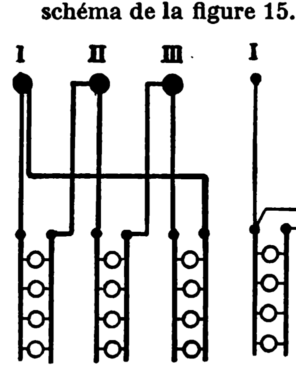


Fig. 13. — Chaque récepteur est monté entre deux bornes de phase. Ce montage est dit *en triangle*.

Fig. 14. — Ce montage est équivalent au précédent. Il ne comporte que 3 fils de ligne.

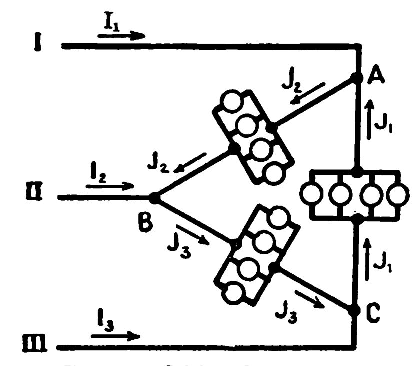


Fig. 15. — Schéma de montage *en triangle* de trois groupes de lampes.

b) Mesurons l'intensité J dans les récepteurs : nous trouvons 3 ampères; puis l'intensité I dans les fils de ligne : nous trouvons 5,2 ampères.

6. Calculons le rapport théorique de ces intensités à l'aide du diagramme vectoriel.

Les lampes sont des résistances pures; les intensités qu'elles absorbent sont en phase avec les tensions à leurs bornes. Les intensités J_1, J_2, J_3 ont donc entre elles une différence de phase d'un tiers de période, elles sont représentées par les trois vecteurs de la figure 16.

Choisissons comme sens positifs dans la figure 15 les sens des flèches. Il en résulte qu'à un instant donné quelconque :

$$\begin{aligned} i_1 + j_1 &= j_2 \\ i_2 + j_2 &= j_3 \\ i_3 + j_3 &= j_1 \end{aligned} \quad \text{ou} \quad \begin{aligned} i_1 &= j_2 - j_1 \\ i_2 &= j_3 - j_2 \\ i_3 &= j_1 - j_3. \end{aligned}$$

Les intensités I_1, I_2, I_3 sont donc représentées dans la figure 16 par les vecteurs différences $\vec{AB}$, $\vec{BC}$, $\vec{CA}$. Le triangle ABC est équilatéral et $AB = OA\sqrt{3}$.

Donc

$$\boxed{I = J\sqrt{3} = 1{,}732\ J.}$$

Les intensités que nous avons mesurées satisfont à cette relation puisque nous avons trouvé I = 5,2 A J = 3 A et que 5,2 = 3 × 1,732.

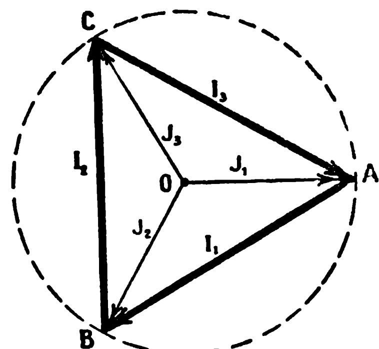


Fig. 16. — Diagramme des intensités dans le montage en triangle : $I = J\sqrt{3}$.

Remarque 1. — Si les trois récepteurs en triangle étaient inductifs avec la même impédance et le même cos φ, notre conclusion serait la même.

Remarque 2. — Quand les trois récepteurs formant les côtés du triangle sont identiques, les circuits sont dits *équilibrés*.

7. Cas des phases déséquilibrées : expérience.

Supprimons les lampes de l'une des phases : le fonctionnement des lampes dans les deux autres phases n'est pas modifié. Toutefois nous constatons que les intensités dans les fils de ligne sont différentes.

I_1 = 5,2 ampères, I_2 = 3 ampères, I_3 = 3 ampères.

La tension aux bornes des récepteurs n'est pas beaucoup changée si la chute de tension dans les lignes est faible.

8. Puissance consommée par l'ensemble de trois récepteurs identiques montés en triangle.

Soient U la tension entre deux fils de ligne, I l'intensité dans chaque ligne. Désignons par J l'intensité dans chaque récepteur et par cos φ le facteur de puissance de chaque appareil.

La puissance consommée par chacun est

$$UJ \cos\varphi$$

et pour l'ensemble des trois :

$$P = 3\,UJ \cos\varphi.$$

Or, $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$, donc

$$\boxed{P = UI\sqrt{3}\cos\varphi.}$$

La formule est la même que dans le cas du montage en étoile.

On n'oubliera pas que φ n'est pas le déphasage entre U et I, mais entre U, tension entre les bornes d'un récepteur, et J, intensité dans ce récepteur.

C. COMPARAISON ENTRE LES DEUX MONTAGES

9. Parce que la formule $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$ convient au montage en étoile et au montage en triangle, il ne faut pas en conclure que les deux montages sont équivalents.

a) Entre les fils de ligne d'une tension triphasée, on peut monter trois récepteurs identiques donnés soit en étoile, soit en triangle.

Quand ils sont en étoile, la tension aux bornes de chacun d'eux est V, tension simple (entre phases et point neutre). Quand ils sont en triangle, la tension aux bornes de chacun d'eux est U, tension composée (entre deux phases).

Or, la puissance absorbée par un récepteur est proportionnelle au carré de la tension appliquée à ses bornes[1]. Comme $U = V\sqrt{3}$ et, par suite $U^2 = 3V^2$, *la puissance que consomment les trois récepteurs montés en triangle est trois fois plus grande que celle qu'ils absorbent quand ils sont montés en étoile.*

b) Cette propriété justifie le mode de démarrage dit *étoile-triangle* que l'on emploie pour les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil de petite puissance (3 à 4 *ch*). Ces moteurs comportent trois enroulements identiques alimentés par la distribution triphasée. Les enroulements sont montés en triangle pour la marche normale. Au démarrage, on les couple en étoile avec un commutateur spécial : le moteur démarre à tiers de puissance et absorbe une intensité moindre que par démarrage direct en triangle.

Soulignons que ce mode de démarrage n'est possible que si le moteur, en régime normal, doit avoir ses enroulements couplés en triangle.

c) Car un moteur triphasé, en régime normal, peut aussi avoir ses 3 enroulements couplés en étoile.

Soit, par exemple, un moteur construit pour fonctionner normalement sous une tension de 200 volts entre les extrémités de chacun de ses enroulements :

1° Sur un secteur à 200 volts entre phases, on couple ces enroulements en triangle;

2° Sur un secteur à 350 volts entre phases (soit $200\sqrt{3}$), on les couple en étoile.

1. Cette proposition est facile à démontrer. Soit un récepteur d'impédance Z et dont le facteur de puissance est $\cos\varphi$. Sous la tension U, il absorbe une intensité $I = \frac{U}{Z}$ et consomme une puissance $P = UI\cos\varphi$, soit $P = \frac{U^2}{Z}\cos\varphi$, donc proportionnelle au carré de la tension.

Ces deux modes de couplage sont rendus possibles grâce à l'artifice suivant. Lors de la construction du moteur, le fabricant a connecté les 6 extrémités des 3 enroulements aux 6 bornes d'une plaque fixée sur le bâti (fig. 17). Lorsqu'on installe le moteur, on couple ces enroulements soit en étoile (fig. 18-1), soit en triangle (fig. 18-2).

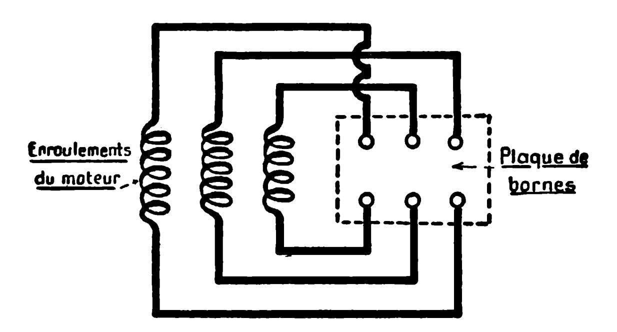


Fig. 17. — Connexions des trois enroulements d'un moteur triphasé à la plaque de bornes. Remarquer que les deux extrémités d'un même enroulement ne sont pas connectées à des bornes directement opposées.

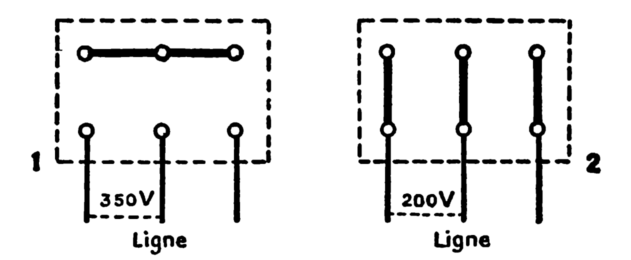


Fig. 18. — Connexions de la ligne triphasée aux bornes d'un moteur.
1 La tension est 350 V entre phases : montage en étoile.
2 id. 200 V id. : id. triangle.
Dans les deux cas la puissance du moteur est la même.

Dans les deux cas la puissance est la même, puisque les tensions entre les extrémités des enroulements, et par suite les intensités dans ces enroulements sont les mêmes.

On peut dire aussi : soit P la puissance du moteur en étoile sous 350 volts; si on alimente ce moteur en étoile sous 200 volts, sa puissance est 3 fois plus faible, P : 3; si, alors, on remplace le couplage en étoile par le couplage en triangle, la puissance est triplée et redevient P.

Résumé.

Quand la tension entre phases d'une distribution triphasée est U et l'intensité dans chaque ligne I :

1° Si les trois récepteurs sont couplés en étoile, c'est-à-dire entre phases et neutre, la tension aux bornes de chaque récepteur est U : $\sqrt{3}$ et l'intensité dans chaque phase est I.

2° Si les trois récepteurs sont couplés en triangle, c'est-à-dire entre phases, la tension aux bornes de chaque récepteur est U et l'intensité dans chaque récepteur est I : $\sqrt{3}$.

3° La formule de la puissance absorbée est la même dans les deux cas :

$$P = UI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

φ étant le déphasage entre tension et intensité dans chaque récepteur.

Exercices.

1. Montrer que le diagramme vectoriel explique les résultats expérimentaux indiqués aux § 3 *a*) et *c*) de la leçon.

2. Calculer l'intensité absorbée par un moteur triphasé de 10 *ch*, 200 *V*, dont le rendement est 0,80 et le cos φ 0,75.

3. Un atelier est alimenté par une ligne triphasée. La tension entre phases est 200 *V*. L'installation comprend 30 lampes à incandescence absorbant chacune 0,5 *A* montées en triangle équilibré et un moteur de 10 *ch* dont le rendement est 0,90 et le facteur de puissance 0,80.

1° Calculer l'intensité dans les fils de ligne quant les lampes fonctionnent seules.

2° Calculer l'intensité en ligne quand le moteur fonctionne seul.

3° Calculer l'intensité en ligne quand lampes et moteurs fonctionnent simultanément.

4° Calculer dans ce cas le cos φ de l'installation.

4. Une ville est éclairée avec 3 000 lampes de 100 watts réparties également sur les trois phases d'une distribution en étoile dont la tension entre phases est 200 volts.

Le fil neutre est coupé. On demande la tension aux bornes de chaque groupe de lampes;

1° si toutes fonctionnent;

2° si 1 000 lampes d'un groupe sont allumées, 500 d'un autre et toutes celles du troisième groupe éteintes.

5. Une installation d'éclairage est alimentée par une distribution triphasée à *quatre fils* à la tension de 190 volts entre phases.

Les lampes sont montées en dérivation entre les fils principaux et le fil neutre, savoir :

33 lampes de 100 watts sur la phase I,

22 lampes de 100 watts sur la phase II,

11 lampes de 100 watts sur la phase III.

Déterminer l'intensité du courant dans chaque fil de phase et dans le fil neutre.

On calculera l'intensité dans chaque branche du montage en admettant que la tension du fil neutre par rapport au sol est nulle. On déterminera graphiquement la somme géométrique des trois courants en tenant compte qu'ils sont déphasés, chacun par rapport aux autres, de $2\pi : 3$.

6. Dans une installation triphasée avec fil neutre, la tension est 190 volts entre phases. Trois groupes de chacun 11 lampes de 100 watts sont montés en dérivation entre les fils principaux et le fil neutre.

Entre les phases I et II est installé un appareil de chauffage qui absorbe 1 900 watts.

On demande de déterminer l'intensité du courant dans les quatre fils de ligne.

Mesure de la puissance absorbée par un récepteur triphasé.

A. MESURE AU WATTMÈTRE

1. Distribution à quatre fils.

a) La puissance absorbée par un récepteur triphasé est la somme des puissances absorbées par chacun des trois circuits qui le constituent.

On monte un wattmètre sur chaque phase. Le courant de chaque phase traverse la bobine d'intensité; la bobine de tension est montée entre le fil de phase et la ligne neutre (fig. 1). On lit en même temps les indications des trois appareils et on fait la somme des puissances trouvées.

Si la puissance absorbée par le récepteur est constante pendant la durée des mesures, on peut se servir d'un seul wattmètre en le montant successivement dans chaque phase.

Si les circuits sont équilibrés, un seul wattmètre suffit encore : on triple la puissance mesurée sur une phase.

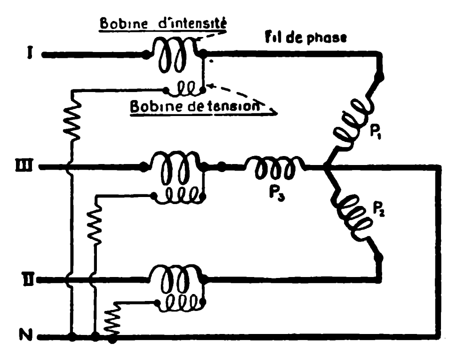


Fig. 1. — Montage de trois wattmètres dans une distribution à quatre fils.
La puissance P mise en jeu est égale à $P_1 + P_2 + P_3$.

b) la méthode des trois wattmètres a l'inconvénient d'exiger trois appareils, ou, si l'on n'emploie qu'un seul wattmètre, d'obliger à des montages et démontages qui durent plusieurs minutes pendant lesquelles la puissance à mesurer peut varier.

2. Distribution à trois fils : point neutre artificiel.

Quand le récepteur est couplé en triangle, ou, s'il est couplé en étoile, quand le point neutre est inaccessible, on crée un point neutre en réu-

nissant les extrémités de trois grandes résistances[1] égales branchées d'autre part sur les trois fils de ligne (fig. 2).

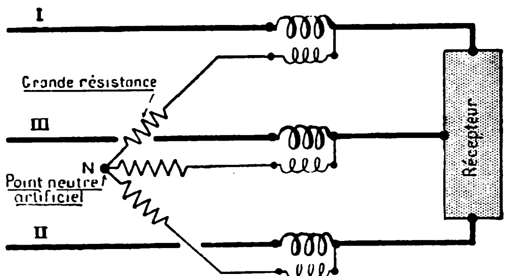


Fig. 2. — Montage de trois wattmètres avec un point neutre artificiel.

On revient ainsi au cas précédent.

Remarquons que les circuits de tension des wattmètres possèdent une grande résistance : leur réunion en un seul point suffit donc à constituer un point neutre artificiel et les résistances spéciales sont inutiles.

Si les trois phases du récepteur sont équilibrées, les trois wattmètres indiquent la même puissance sur chaque phase.

S'il y a déséquilibre, les indications des trois appareils ne sont pas égales et leur somme représente la puissance cherchée.

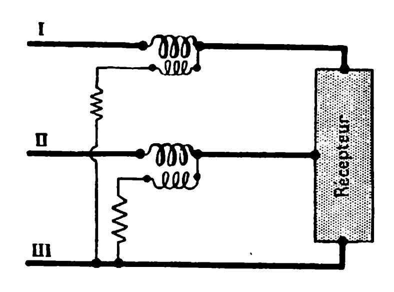


Fig. 3. — Méthode des deux wattmètres. C'est la méthode la plus employée.
Comparez ce montage au précédent : le point neutre artificiel est pris sur la 3e phase, ce qui rend inutile le 3e wattmètre.

3. Méthode des deux wattmètres : c'est la méthode la plus employée.

Puisque l'équilibre des trois wattmètres n'est pas nécessaire, on peut choisir le point commun des circuits de tension sur l'un des fils de phase. Le wattmètre monté sur ce fil devient inutile : il indiquerait une puissance nulle puisque sa bobine de tension ne serait parcourue par aucun courant; on le supprime et deux wattmètres suffisent à la mesure de la puissance totale (fig. 3).

La méthode des deux wattmètres est celle qui est employée dans la pratique industrielle.

4. Expériences.

Soit à mesurer la puissance absorbée par un petit transformateur triphasé en charge et à vide.

a) pour n'utiliser qu'un seul wattmètre, nous nous servons d'un *commutateur* (fig. 4), avec lequel le circuit d'intensité du wattmètre

1. Les résistances doivent être grandes pour que leur introduction dans les circuits ne modifie pas de façon appréciable le régime existant.

passe rapidement de la phase I à la phase II de la ligne triphasée, sans que le courant soit interrompu dans le récepteur. La bobine tension reste toujours branchée sur la bobine d'intensité du wattmètre d'une part et sur la troisième phase d'autre part.

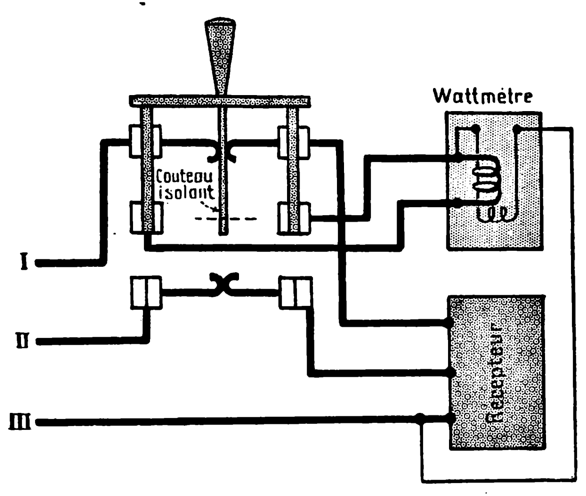


Fig. 4. — Commutateur pour mesure de puissance par la méthode des deux wattmètres. — Il permet, sans interrompre les courants, d'envoyer dans la bobine d'intensité du wattmètre, soit le courant de la phase I, soit le courant de la phase II.

b) Le transformateur étant à pleine charge, les lectures faites pour chacune des positions du wattmètre sont :

$$P_1 = 1\,395 \text{ watts}$$
$$P_2 = 785 \text{ watts.}$$

La puissance absorbée par le transformateur est

$$P = P_1 + P_2 = 2\,180 \text{ watts.}$$

Quand le transformateur est à vide, le wattmètre indique sur la phase I :

$$P_1 = 70 \text{ watts.}$$

Quand il passe sur la phase II, son aiguille tend à dévier en sens contraire de la graduation de l'échelle : la puissance à mesurer est négative. Pour amener l'aiguille sur l'échelle, *il faut inverser le courant*, soit dans la bobine de tension, soit de préférence dans la bobine d'intensité (l'inverseur n'est pas représenté sur la figure), et nous lisons :

$$P_2 = 34 \text{ watts.}$$

Puisque la puissance P_2 est négative, le transformateur absorbe :

$$P = P_1 - P_2 = 36 \text{ watts.}$$

5. Pourquoi les deux lectures au wattmètre sont-elles parfois de signes contraires?

Traçons le diagramme vectoriel des tensions et intensités : 1° dans le récepteur triphasé; 2° dans le wattmètre (fig. 5).

Nous supposerons le récepteur en étoile; nous pourrions le supposer monté en triangle sans que l'étude du diagramme soit plus difficile.

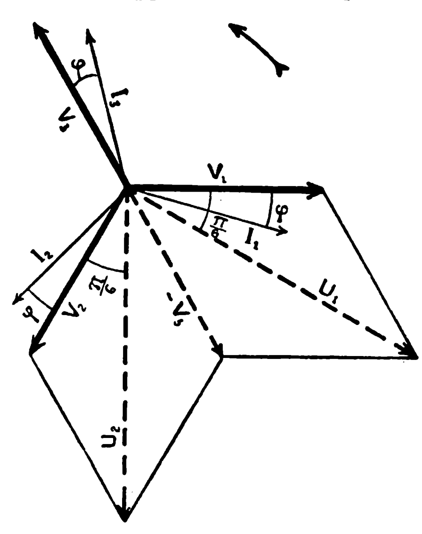


Fig. 5. — Diagramme des tensions et intensités dans la méthode du double wattmètre.

Représentons par V_1, V_2, V_3 les tensions simples, par I_1, I_2, I_3 les intensités dans les trois branches du récepteur; ce sont aussi les intensités dans les lignes. Les intensités sont déphasées de l'angle φ en arrière des tensions simples.

Quand le wattmètre est monté sur la phase I, la bobine d'intensité est parcourue par le courant I_1. Aux extrémités de la bobine de tension est appliquée la tension $\vec{U_1}$ dont la valeur $\vec{V_1} - \vec{V_3}$ s'obtient en composant les deux vecteurs $\vec{V_1}$ et $-\vec{V_3}$. L'intensité I_1 est déphasée de $\frac{\pi}{6} - \varphi$ sur U_1; le wattmètre indique donc une puissance

$$P_1 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) \qquad (1)$$

Quand le wattmètre est monté sur la phase II, la bobine d'intensité est parcourue par l'intensité I_2. Aux bornes de la bobine de tension agit la tension $\vec{U_2} = \vec{V_2} - \vec{V_3}$, déphasée de $\frac{\pi}{6} + \varphi$ sur I_2; le wattmètre mesure :

$$P_2 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) \qquad (2)$$

La puissance totale est $P = P_1 + P_2$.

Or, l'angle φ est compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. Si cet angle est inférieur à $\frac{\pi}{3}$, les angles $\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$ et $\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$ des expressions (1) et (2) sont inférieurs en valeur absolue à $\frac{\pi}{2}$, et quels que soient les signes de ces angles, leurs cosinus sont positifs. P_1 et P_2 sont alors positifs.

Si φ est compris entre $\frac{\pi}{3}$ et $\frac{\pi}{2}$, l'angle $\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$ de l'expression (1), qui est compris entre $-\frac{\pi}{6}$ et $-\frac{\pi}{3}$, a un cosinus positif, P_1 est positif. L'angle $\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$ de l'expression (2) dépasse $\frac{\pi}{2}$, son cosinus est négatif et P_2 est négatif.

En somme, si le récepteur est assez inductif pour que le déphasage entre intensité et tension dépasse $\pi/3$ radians, c'est-à-dire pour que le $\cos\varphi$ soit inférieur à 0,50, l'une des puissances mesurées au wattmètre dans la méthode du double wattmètre est négative.

Remarque. — 1. En effectuant la somme des expressions

$$P_1 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) \qquad \text{et} \qquad P_2 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$$

à l'aide de la formule qui donne le cosinus d'une somme ou d'une différence d'angles, on trouve.

$$P_1 + P_2 = UI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

C'est une nouvelle justification de la méthode des deux wattmètres.

2. En divisant membre à membre les expressions (1) et (2), on obtient l'équation trigonométrique

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)}$$

avec laquelle on peut calculer le déphasage φ en fonction de P_1 et P_2. Nous ne ferons pas ce calcul.

3. Nous savons que la tension composée U_2 est en quadrature avec la tension simple V_1 (fig. 5). Si nous faisons passer le courant I_1 dans la bobine à gros fil d'un wattmètre et si nous appliquons la tension U_2 aux bornes du circuit à fil fin, l'appareil mesure une puissance :

$$P_r = UI\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = UI\sin\varphi = \sqrt{3}VI\sin\varphi.$$

Or, la ***puissance réactive*** du récepteur est $3\ VI\sin\varphi$. Elle est donc égale à $P_r\sqrt{3}$.

B. MESURE AVEC AMPÈREMÈTRE, VOLTMÈTRE ET PHASEMÈTRE

Pour mesurer la puissance consommée dans une installation avec un wattmètre, il faut arrêter provisoirement l'installation pour mettre en circuit le wattmètre avec son commutateur.

Il y a parfois intérêt à effectuer la mesure sans arrêt, même court, du fonctionnement. La méthode employée est calquée sur celle du double wattmètre.

On mesure :

1° I_1, l'intensité dans la phase I, U_1 la tension entre les phases 1 et 3, puis le cosinus de l'angle de déphasage $\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$ entre I_1 et U_1 et l'on calcule

$$P_1 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right).$$

2° I_2 l'intensité dans la phase II, U_2 la tension entre la phase 2 et la phase 3, le cosinus du déphasage $\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$ entre I_2 et V_2 et l'on calcule

$$P_2 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right).$$

3° on effectue la somme algébrique

$$P = P_1 + P_2.$$

Pour mesurer les intensités sans interrompre le courant afin de mettre les ampèremètres en circuit, on se sert d'une *pince ampèremétrique*. C'est un anneau, coupé suivant un diamètre, fait de couronnes de tôle empilées et portant un enroulement comme un anneau Gramme (fig. 6). On entoure le conducteur avec la pince. Le champ magnétique dû au courant produit un flux alternatif dans l'anneau. Il en résulte une f. é. m. alternative aux extrémités de l'enroulement, f. é. m. qui est fonction de l'intensité à travers la pince. L'enroulement est connecté aux bornes d'un volt-ampèremètre spécialement gradué pour indiquer l'intensité par lecture directe.

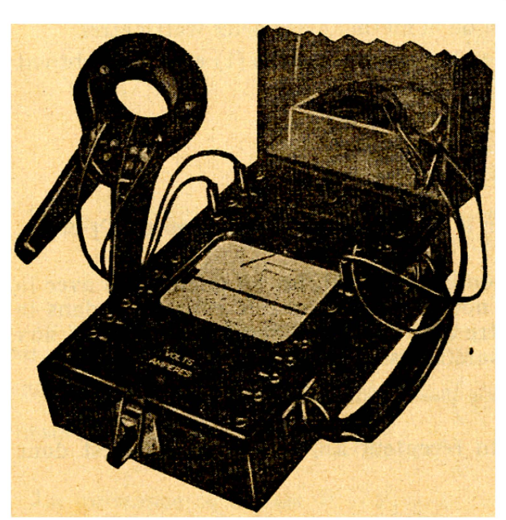


Fig. 6. — Groupement en un seul appareil d'un volt-ampèremètre et d'un phasemètre, pince ampèremétrique.

La tension se mesure en accrochant à deux bornes du circuit deux fils qui aboutissent à des bornes spéciales du volt-ampèremètre.

Enfin un phasemètre logomètre fonctionne avec la pince ampèremé-

trique sur le circuit d'intensité et la tension entre phases sur les bornes de tension de l'appareil.

D'après leur principe de construction, la pince et le phasemètre doivent être étalonnés pour une fréquence déterminée : ils le sont pour la fréquence standard 50 périodes par seconde.

Exercices.

1. **Dessiner le schéma de la figure** 4 **en plaçant un inverseur dans le circuit de tension.**

2. **La puissance absorbée par le petit transformateur triphasé dont il est question au paragraphe 4 précédent a été mesurée pour différentes charges non inductives.**

Les lectures faites sont :

U	200;	200;	200;	200;	200;	*volts.*
I	0,53;	2,2;	3,8;	5,66;	7;	*ampères.*
P_1	70;	440;	745;	1 100;	1 395;	*watts.*
P_2	— 34 ;	230;	510;	785;	785;	*watts.*

Calculer dans chaque cas :
1° la puissance apparente;
2° la puissance active;
3° le $\cos \varphi$.

Construire la courbe du facteur de puissance en fonction de la puissance active. En ordonnées, $\cos \varphi$ sera représenté à raison de 1 mm par centième; en abscisses, 1 kW sera représenté par 5 cm.

3. Compléter le tableau suivant :

φ	$0 \nearrow \frac{\pi}{6} \nearrow \frac{\pi}{3} \nearrow \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{6} - \varphi$	
$\frac{\pi}{6} + \varphi$	
$\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$	
$\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$	
$P_1 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$	
$P_2 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$	
$P_1 + P_2$	
$\sqrt{3} UI \cos \varphi$	

4. **En utilisant les résultats du tableau précédent, tracer avec les mêmes axes de coordonnées les courbes qui représentent les variations de P_1, de P_2 et de**

$$P = P_1 + P_1 = UI\sqrt{3}\cos\varphi,$$

lorsque φ varie de 0 à $\frac{\pi}{2}$ radians.

Échelle des abscisses : 9 *cm* pour $\frac{\pi}{2}$ radians.

Échelle des ordonnées : 6 *cm* pour UI volts-ampères.

Que peut-on conclure de l'examen de ces courbes au sujet des particularités qui se présentent dans l'emploi de la méthode du double wattmètre?

5. **Pour obtenir, par la méthode du double wattmètre, la puissance P absorbée par un récepteur triphasé, on mesure successivement**

$$P_1 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$$

$$P_2 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right).$$

Démontrer que :

1° $$P = P_1 + P_2 = UI\sqrt{3}\cos\varphi$$

2° $$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}$$

et déterminer $\cos\varphi$ quand $P_1 = 1\,395$ watts et $P_2 = 785$ watts.

6. **En mesurant par la méthode du double wattmètre la puissance absorbée par un récepteur triphasé on a trouvé $P_1 = P_2$. Que faut-il en conclure?**

7. **Pour déterminer, par la méthode du double wattmètre, la puissance absorbée par un récepteur triphasé, on mesure successivement**

$$P_1 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$$

$$P_2 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$$

Calculer $P_1 - P_2$. Que représente le résultat trouvé?

Solution. **On sait que**

$$\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) = \cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi + \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi$$

et $$\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) = \cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi - \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi$$

Donc $$P_1 - P_2 = 2UI\sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi$$

et, puisque $\sin\frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}$

$$P_1 - P_2 = UI\sin\varphi.$$

Or $UI\sqrt{3}\sin\varphi$ est la puissance réactive P_r absorbée par le récepteur, donc :

$$P_r = (P_1 - P_2)\sqrt{3}.$$

La méthode du double wattmètre permet de mesurer la puissance réactive absorbée par un récepteur triphasé.

Problèmes de révision.

2e partie : ÉLECTROMAGNÉTISME

1. Quatre petites aiguilles aimantées mobiles sur des pivots verticaux se trouvent aux sommets d'un carré horizontal dont l'une des diagonales de longueur 10 *cm* est située dans le plan méridien magnétique. Le carré est traversé en son centre par un fil vertical parcouru par un courant de 5 A dirigé de bas en haut. La composante horizontale du champ magnétique terrestre est 0,02 *millitesla.* Déterminer la direction prise par chacune des aiguilles. (34e *et* 36e *Leçons.*)

2. Un tube de carton cylindrique porte deux enroulements à spires jointives B_1 et B_2 formés d'un même fil fin. Ces deux enroulements sont superposés; B_1 a une longueur $l_1 = 50$ *cm*, B_2 une longueur $l_2 = 30$ *cm*.

La résistance de B_1 est 300 Ω; lorsqu'une tension de 120 V existe entre ses extrémités, l'induction magnétique à l'intérieur du tube est $1{,}25 . 10^{-3}$ *Wb/m*². Quel est le nombre de spires de B_1?

On branche, sous la même tension que ci-dessus, les deux enroulements en série de façon que les champs magnétiques qu'ils produisent séparément soient de même sens.

Quelle est l'induction magnétique à l'intérieur du tube?

On néglige l'influence du champ magnétique terrestre. (36e *Leçon*).

3. Un conducteur ABCD a la forme d'un rectangle incomplet et peut tourner autour de l'axe horizontal AD :

$$AB = CD = 2\,BC = 20\ cm.$$

Le fil qui constitue ce conducteur pèse 60 *g*; il est parcouru par un courant de 20 *A*.

a) Indiquer clairement, en s'aidant d'un croquis, comment il faut placer un aimant en fer à cheval pour que BC s'écarte d'un angle α du plan vertical ABCD sous l'action d'une force électromagnétique perpendiculaire à ce plan.

b) Le champ d'induction entre les branches de l'aimant est uniforme, sa valeur est 0,02 *Wb/m*². Déterminez la position d'équilibre du cadre en calculant l'angle α.

(40e *Leçon.*)

4. A égale distance des extrémités et dans le plan de section droite d'un barreau aimanté ayant la forme d'un cylindre de 4 *cm* de diamètre, on enroule une bobine plate formée de 200 spires d'un fil très fin de résistance 15 Ω. Des conducteurs de résistance négligeable réunissent cette bobine à un galvanomètre balistique de résistance 615 Ω.

On retire rapidement la bobine et on l'amène loin de l'aimant. Le galvanomètre indique alors le passage d'une quantité d'électricité de 60 μ*C*.

Calculer l'induction moyenne dans la section médiane de l'aimant.

(37e *et* 43e *Leçons.*)

5. Une bobine plate comporte 200 spires rectangulaires de dimensions moyennes 20 × 15 *cm*. Cette bobine peut tourner autour d'un axe horizontal que l'on dirige perpendiculairement aux lignes d'induction d'un champ magnétique uniforme dont $\mathcal{B}$ = 0,02 *tesla*.

a) Calculer le flux d'induction magnétique maximum à travers le cadre.

b) Représenter graphiquement les variations de ce flux lorsque la bobine fait un tour à partir de la position correspondant au flux maximum.

c) La bobine fait un tour en 0,1 *s*; calculer la f. é. m. moyenne induite pendant un tour, un demi-tour, un quart de tour. (43ᵉ *Leçon.*)

6. Une ligne aérienne est formée de deux conducteurs rectilignes, parallèles, très longs. Leur plan est horizontal. Ces conducteurs sont parcourus par un courant continu. Leur distance d'axe en axe est 20 *cm*.

Dans le plan de la ligne, à égale distance des deux conducteurs on dispose une petite bobine plate de 1500 spires. Chaque spire a une surface de 5 cm^2 et une résistance de 0,01 Ω.

On réunit cette bobine à un galvanomètre balistique de résistance 385 Ω. Lorsqu'on retourne brusquement la bobine le balistique indique le passage d'une quantité d'électricité de 2 μC.

Calculer le courant dans la ligne.

La composante verticale du champ magnétique terrestre est de 4.10^{-5} Wb/m^2; le courant dans la ligne est de sens tel que son action magnétique s'ajoute à celle du champ terrestre. *(36ᵉ et 43ᵉ Leçons).*

7. A l'intérieur d'une bobine annulaire (bobine enroulée sur un anneau) l'induction magnétique a même valeur qu'à l'intérieur d'une bobine longue. Les ligne d'induction sont des circonférences concentriques.

Une bobine est enroulée sur un tore en bois à section circulaire, de diamètre intérieur 20 *cm* et de diamètre extérieur 40 *cm*. Cette bobine comprend 1 000 spires de fil très fin, régulièrement enroulées en une seule couche. Calculer en *microhenrys* le coefficient d'auto-induction de cette bobine. (44ᵉ *Leçon.*)

8. Un galvanomètre de résistance 100 Ω donne sa déviation totale pour un courant de 5 *m*A.

1° Calculer la résistance des shunts qui permettraient d'en faire un ampèremètre pour des courants de 0 à 1 A, de 0 à 10 A, de 0 à 100 A.

2° Calculer les résistances à utiliser pour en faire un voltmètre susceptible de mesurer des tensions de 0 à 10 V, 0 à 50 V, 0 à 150 V.

3° Représenter le montage aux bornes d'une installation d'un voltmètre et d'un ampèremètre constitués comme les précédents.

4° Un voltmètre gradué de 0 à 100 V marque 100 V quand il est traversé par un courant de 0,05 A. Un ampèremètre gradué de 0 à 20 A marque 20 A quand la différence de potentiel entre ses bornes est 0,5 V.

Donner les indications des deux appareils dans les deux montages possibles aux bornes d'une installation qui consomme un courant de 10 A sous une tension de 80 V. Faire les deux schémas de montage. (47ᵉ *Leçon.*)

9. 1° On dispose d'un milliampèremètre à cadre mobile gradué de 0 à 50 *m*A. Sa résistance intérieure est de 1 Ω. Quelles sont les valeurs des résistances et comment faut-il les brancher pour transformer cet appareil :

a) en un voltmètre destiné à la mesure de f. é. m. allant de 0 à 2,5 V?

b) en un ampèremètre destiné à la mesure d'intensités allant de 0 à 2,5 A?

2° On veut construire ce milliampèremètre en suspendant le cadre mobile à un fil

de torsion vertical. Le cadre comporte N = 200 spires, la spire moyenne a la forme d'un rectangle ($a = 3$ *cm*; $b = 2$ *cm*).

Les grands côtés peuvent tourner autour de l'axe fourni par le fil de torsion dans un entrefer de révolution constitué par un cylindre de fer doux entouré par les pièces polaires N et S d'un aimant. On admettra que, dans la zone où peuvent se déplacer les côtés verticaux, ceux-ci sont soumis sur toute leur longueur à un champ H = 1 000 *œrsteds* dont les lignes de force horizontales sont dirigées vers l'axe de rotation du cadre.

On veut que le cadre dévie de 60° pour un courant de 50 *m*A. Quelle doit être la valeur K du couple de torsion du fil de suspension (K, couple de torsion pour une rotation de 1°)?

Quelle doit être la section en millimètres carrés du fil de cuivre constituant le cadre pour que sa résistance soit de 1 Ω? Résistivité du cuivre $\rho = 1{,}6 \times 10^{-6}\ \Omega.cm$.

(46° *et* 47° *Leçons*, *Baccalauréat*.)

10. Un ampèremètre est constitué par un cadre carré de 20 *mm* de côté comprenant 100 spires de fil et tournant sur deux pivots autour d'une médiane dans un entrefer cylindrique où le champ est radial, c'est-à-dire toujours dirigé vers l'axe de rotation, et de valeur constante B. L'aiguille de l'ampèremètre, fixée au cadre, a 12,5 *cm* de longueur.

1° En fixant un ressort léger à l'extrémité de l'aiguille en guise de dynamomètre, on constate que s'il passe un courant de 0,1 *A* dans le fil du cadre, l'extrémité de l'aiguille exerce sur le dynamomètre, normalement à sa propre direction, une force égale au poids de 80 *mg*. Quelle est, en *wéber par m²*, la valeur de l'induction B?

2° Le couple antagoniste de l'ampèremètre est constitué par les deux ressorts spiraux qui amènent le courant au cadre. Ils donnent un couple de torsion proportionnel à l'angle θ de rotation du cadre, $M = C\theta$. Déterminer la constante C pour que l'aiguille tourne de 60° à partir du zéro par un courant de 0,1 *A*.

3° Les divisions de la graduation seront-elles égales?

4° Le fil du cadre a un diamètre de 0,2 mm. On veut shunter l'ampèremètre avec un fil de cuivre de 20 *cm* de longueur de même résistivité que le fil du cadre pour que l'ampèremètre puisse mesurer des intensités jusqu'à 100 A. Quel devra être le diamètre du fil de shunt?

Les connexions entre le cadre et le shunt ont une résistance négligeable.

(40°, 46° *et* 47° *Leçons*, *Baccalauréat Besançon* 1949.)

3ᵉ partie : COURANT ALTERNATIF

Les problèmes dont les énoncés suivent ont été proposés aux examens pour l'obtention du diplôme d'élève breveté d'Ecoles nationales professionnelles.

11. ENP Saint-Étienne. — Un courant alternatif de 0,5 A, fréquence 50 p/s, traverse les récepteurs suivants en série :

1° une résistance ohmique R = 20 Ω,

2° une bobine de self L = 1H,

3° une bobine d'impédance Z = 30 Ω dont on connaît la résistance $r = 15\ \Omega$,

4° un condensateur d'une capacité C = 10,4 μF.

Calculer la tension aux bornes de chacun des appareils ci-dessus ainsi que la puissance réelle absorbée par l'ensemble.

Représenter graphiquement les tensions par rapport au courant pris comme origine des phases.

Trouver la tension aux bornes de l'ensemble des récepteurs.

(60°, 61° *et* 62° *Leçons*.)

12 ENP *Lyon*. — Un réseau à courant alternatif (120 V, 50 p/s) alimente un circuit dont les constantes sont :

$$R = 6 \textit{ ohms},$$
$$L = 0{,}08 \textit{ henry}.$$

On demande :

1° le courant et la puissance absorbés par ce circuit;

2° la capacité nécessaire pour réaliser la résonance;

3° l'intensité du courant quand la condition de résonance est réalisée.

(61° *et* 62° *Leçons*.)

13. ENP *Saint-Étienne*. — Une bobine à impédance mise sous la tension continue de 115 V laisse passer un courant de 11,5 A. — Sous une même tension alternative de fréquence 50 p/s, l'intensité devient 5,75 A.

Trouver :

1° la résistance ohmique de la bobine et son impédance;

2° la puissance réelle prise par la bobine;

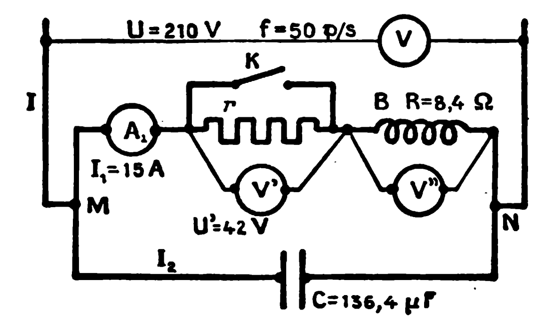
3° la puissance apparente prise par la bobine;

4° le cos φ;

5° la puissance réactive. (61° *et* 63° *Leçons*)

14. ENP *Vierzon*. — Une tension alternative de fréquence $f = 50$ *p/s* et de valeur efficace $U = 210$ V est appliquée entre les extrémités M et N d'un circuit (fig. 1).

La partie supérieure de ce circuit comprend une résistance pure r en série avec une bobine de self-induction à noyau B de résistance ohmique $R = 8{,}4\ \Omega$. Un



interrupteur K permet de court-circuiter la résistance r; lorsqu'il est ouvert, l'intensité I_1 du courant dans la résistance et dans la bobine est de 15 A et la tension U' entre les extrémités de r est de 42 V.

La partie inférieure est constituée par un condensateur dont la capacité est $C = 136{,}4\ \mu F$.

Déduire de ces données :

1° la valeur de la résistance r;

2° la longueur du fil cylindrique de constantan qui constitue cette résistance sachant que son diamètre est 2 mm et le coefficient de résistivité du constantan $\rho = 50\ \mu\Omega.$ cm;

3° la quantité de chaleur dégagée dans ce fil en 1 h. 23 mn 20 s;

4° l'impédance Z de la bobine de self B;

5° la tension U'' entre les bornes de cette bobine;

6° le cofficient de self L de cette bobine;

7° son facteur de puissance cos φ'';
8° le facteur de puissance $\cos \varphi_1$ de la partie supérieure du circuit;
9° l'intensité I_2 du courant dans le condensateur;
10° l'intensité I du courant dans les conducteurs aboutissant en M et N;
11° le facteur de puissance $\cos \varphi$ de l'ensemble du circuit entre M et N;
12° la valeur de l'intensité I_1 lorsque K est fermé;
13° la nouvelle valeur de I;
14° les puissances réelle et réactive absorbées entre M et N lorsque l'interrupteur K est fermé.

Trois circuits rigoureusement identiques au précédent sont associés en triangle; les sommets du triangle sont réunis aux bornes d'un alternateur triphasé qui donne une tension constante U = 210 V de fréquence $f = 50$ p/s. Quelles sont les intensités des courants dans les conducteurs :

a) lorsque K est ouvert;
b) lorsque K est fermé. (61e, 62e, 63e, 65e *et* 66e *Leçons*.)

15. *ENP Thiers*. — Une petite installation, alimentée par une ligne monophasée 200 volts, 50 périodes par seconde, comporte 40 lampes de 50 watts, un moteur de 10 *ch* ($\cos \varphi = 0,74$, rendement 0,80), et un moteur de 20 *ch* ($\cos \varphi = 0,76$, rendement 0,82).

1° Quelle est l'intensité absorbée et quel est le cos φ de l'installation?

2° Quelles sont la capacité et la puissance réactive d'un condensateur susceptible de relever jusqu'à 0,85 le cos φ? Quelle sera alors l'intensité absorbée?

3° Quelle devrait être la tension à l'usine génératrice, avant et après le relèvement du cos φ, pour maintenir constante la tension à l'arrivée de l'installation?

La résistance de la ligne est 0,075 ohm, sa réactance de self, 0,05 ohm.

(63e *et* 64e *Leçons*).

16. *ENP Armentières*. — Une installation domestique comprend :

a) une installation d'éclairage;
b) une installation de force motrice comprenant un moteur monophasé.

Avec un ampèremètre, on fait les observations suivantes :

1° le moteur fonctionnant seul, intensité absorbée : 6 A;
2° les lampes fonctionnant seules, intensité absorbée : 10 A;
3° les lampes et le moteur ensemble, intensité absorbée : 15,5 A.

On demande de déduire de ces observations :

1° le cos φ du moteur;
2° le cos φ de l'installation lorsque toutes les lampes et le moteur fonctionnent simultanément.

En admettant que la tension aux bornes du moteur soit de 110 V, calculer :

1° sa puissance en *ch*;
2° la puissance réactive qu'il absorbe;
3° la puissance réactive nécessaire pour ramener l'intensité dans l'installation à être en phase avec la tension. (63e et 64e *Leçons*).

17. *ENP Morez*. — *a*) Une installation monophasée absorbe un courant de 200 A sous une tension de 115 V. Le facteur de puissance de l'installation étant 0,60, quelle est la puissance réelle absorbée par l'installation?

b) On se propose de relever le facteur de puissance à 0,80 sans modifier la puissance active. Quelle est la puissance réactive à fournir à l'installation?

c) La puissance réactive est fournie par une batterie de condensateurs; quelle doit être la capacité de la batterie?

Fréquence du courant : 50 p/s. (64e *Leçon*).

18. ENP Nantes. — Un atelier est alimenté par du courant triphasé. Ce courant est utilisé pour actionner un moteur triphasé étoile de 20 chevaux (sous 220 volts, tension composée) et pour l'éclairage qui comprend 150 lampes de 50 W montées en dérivation et en triangle.

Calculer :

1° l'intensité du courant dans une lampe;

2° l'intensité du courant dans les enroulements du moteur, si le facteur de puissance de celui-ci est $\cos \varphi = 0{,}85$;

3° l'intensité du courant dans les fils alimentant :

a) les lampes;

b) le moteur;

4° l'intensité totale absorbée par l'installation. (65° *et* 66° *Leçons*).

19. ENP Tarbes 1952 (Réparation). — Une bobine B absorbe : sous 120 V continu 8 A et sous 120 V alternatif 50 H*z*, 4,8 A.

1° Quelle est son inductance L? Quel courant I absorberait-elle sous 120 V, pour les fréquences 100 H*z*, 150 H*z*, 200 H*z*? En déduire la forme de la courbe des variations de I en fonction de *f*?

2° Au moyen d'un condensateur C, on veut, pour la fréquence 50 H*z*, ramener le facteur de puissance à 1. Quelle est la capacité de C :

a) Si on le monte en série avec B.

b) Si on le monte en dérivation avec B.

Quelle est, dans chaque cas, la puissance active consommée.

(61°, 62° *et* 64° *Leçons*).

20. ENP Tarbes 1952. — Une installation monophasée, alimentée sous 110 V, 50 H*z*, comprend :

a) Des lampes à incandescence.

b) Un moteur asynchrone monophasé.

Avec un ampèremètre, on a fait les mesures suivantes :

1° Intensité du courant absorbé par les lampes seules : 12 A.
2° — par le moteur seul : 20 A.
3° — par l'ensemble : 30 A.

A. Déduire de ces mesures :

a) le facteur de puissance du moteur.

b) le facteur de puissance de l'installation quand tout fonctionne.

B. Calculer :

a) La puissance réactive absorbée par le moteur.

b) Les indications fournies par deux compteurs d'énergies active et réactive après 5 h de fonctionnement de l'ensemble.

c) La capacité d'un condensateur à monter en dérivation avec les appareils utilisés, pour que le facteur de puissance de l'installation devienne égal à 1. Les indications des compteurs sont-elles modifiées? (64° *Leçon*).

21. ENP Tarbes 1953 (Réparation). — On dispose :

1° D'une résistance pure A de 20 Ω.

2° D'une bobine B de résistance négligeable et d'inductance L = 0,2 H.

3° D'un condensateur C de 100 μF.

1° On monte en série les 3 appareils A, B et C et on les alimente sous 110 V, 50 H*z*. Quelle est l'intensité du courant qui les traverse? Quelle est la tension aux bornes

de chacun d'eux? Qu'indiquent un phasemètre et un wattmètre montés sur le circuit?

2° Les 3 appareils étant toujours en série, et la tension d'alimentation 110 V, quelle devrait être la fréquence de la source pour que l'intensité du courant soit de 5,5 A?

3° La fréquence est 50 Hz. A la suite d'un accident, les armatures du condensateur C sont court-circuitées. Quelle est la nouvelle intensité du courant?

4° Les 3 appareils A, B et C sont montés sur un circuit triphasé, respectivement entre les phrases 1, 2 et 3, et le neutre. Déterminer graphiquement l'intensité du courant dans chaque fil de phase, et dans le fil neutre, la tension simple étant 110 V, 50 Hz. (61°, 62° *et* 66° *Leçons*).

22. ***ENP Tarbes*** 1954 (Réparation). — Un petit atelier est alimenté par une ligne électrique triphasée 4 fils, 220 V entre phases, 50 Hz.

Il comprend l'appareillage électrique suivant :

a) 4 moteurs asynchrones triphasés de 3 ch, rendement 0,85, facteur de puissance 0,8.

b) 18 lampes à incandescence de 100 W montées en étoile équilibrée.

c) 3 condensateurs de 20 μF chacun, montés en triangle.

A. Calculer l'intensité du courant dans chaque fil de phase quand tous les appareils fonctionnent, et le facteur de puissance de l'ensemble.

B. En dehors des heures de travail, c'est-à-dire pendant 16 h par jour, 6 lampes restent allumées et les condensateurs restent branchés sur le réseau. Combien marquent par journée de 24 h les deux compteurs triphasés, l'un d'énergie active, l'autre d'énergie réactive de l'installation (on sait qu'un compteur ne revient jamais en arrière). Déduire de leurs indications le facteur de puissance moyen journalier. (65°, 66° *et* 67° *Leçons*).

DIVISION EN DEGRÈS

DEGRÈS	SINUS	TANGENTE	COSINUS	DEGRÈS	SINUS	TANGENTE	COSINUS
0	0,000	0,000	1,000				
1	017	017	1,000	46	0,719	1,036	0,695
2	035	035	0,999	47	731	072	682
3	052	052	999	48	743	111	669
4	070	070	998	49	755	150	656
5	0,087	0,087	0,996	50	0,766	1,192	0,643
6	105	105	995	51	777	235	629
7	122	123	993	52	788	280	616
8	139	141	990	53	799	327	602
9	156	158	988	54	809	376	588
10	0,174	0,176	0,985	55	0,819	1,428	0,574
11	191	194	982	56	829	483	559
12	208	213	978	57	839	540	545
13	225	231	974	58	848	600	530
14	242	249	970	59	857	664	515
15	0,259	0,268	0,966	60	0,866	1,732	0,500
16	276	287	961	61	875	804	485
17	292	306	956	62	883	881	469
18	309	325	951	63	891	1,963	454
19	326	344	946	64	899	2,050	438
20	0,342	0,364	0,940	65	0,906	2,145	0,423
21	358	384	934	66	914	246	407
22	375	404	927	67	921	356	391
23	391	424	921	68	927	475	375
24	407	445	914	69	934	605	358
25	0,423	0,466	0,906	70	0,940	2,747	0,342
26	438	488	899	71	946	2,904	326
27	454	510	891	72	951	3,078	309
28	469	532	883	73	956	271	292
29	485	554	875	74	961	487	276
30	0,500	0,577	0,866	75	0,966	3,732	0,259
31	515	601	857	76	970	4,011	242
32	530	625	848	77	974	4,331	225
33	545	649	839	78	978	4,705	208
34	559	675	829	79	982	5,145	191
35	0,574	0,700	0,819	80	0,985	5,671	0,174
36	588	727	809	81	988	6,314	156
37	602	754	799	82	990	7,115	139
38	616	781	788	83	993	8,144	122
39	629	810	777	84	995	9,514	105
40	0,643	0,839	0,766	85	0,996	11,430	0,087
41	656	869	755	86	998	14,301	070
42	669	900	743	87	999	19,081	052
43	682	933	731	88	999	28,636	035
44	695	966	719	89	1,000	57,290	017
45	0,707	1,000	0,707	90	1,000	∞	0,000

TABLE DES MATIÈRES

Ire PARTIE
EFFETS CHIMIQUES ET CALORIFIQUES DU COURANT CONTINU

1. L'ÉNERGIE

2. COURANT ÉLECTRIQUE

3. ACTIONS CALORIFIQUES DES COURANTS

4. ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT ÉLECTRIQUE

5. PILES ÉLECTRIQUES

6. ACCUMULATEURS

7. GÉNÉRALISATION DE LA LOI D'OHM

2e PARTIE
EFFETS MAGNÉTIQUES DU COURANT CONTINU

8. CHAMP ET INDUCTION MAGNÉTIQUE

9. AIMANTATION

10. ACTION DES CHAMPS MAGNÉTIQUES SUR LES COURANTS

11. PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

12. APPAREILS DE MESURES ÉLECTRIQUES ET MESURE DES RÉSISTANCES

3e PARTIE
COURANT ALTERNATIF

13. NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE

14. COURANT ALTERNATIF

15. CIRCUIT PARCOURU PAR UN COURANT ALTERNATIF

16. COURANTS POLYPHASÉS

Imprimé en France
par Brodard-Taupin
Imprimeur - Relieur
Coulommiers - Paris
Éditeur N° 2738
58834 - 7 - 1962
Dépôt légal
3e trimestre 1962.

TECHNOLOGIE DES FABRICATIONS MÉCANIQUES

Collection publiée sous la Direction de **A. CHEVALIER**
Professeur technique de mécanique à l'E. N. N. A. de Paris

20 Fascicules (22,5 x 28), de 64 à 80 pages
Planches en regard du texte

---

1. **Le Livret de l'apprenti débutant**
   Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.
2. **Traçage et travaux de l'ajusteur mécanicien**
   Par E. LECŒUR.
3. **Tournage des métaux**
   Par A. CHEVALIER et R. JOLYS.
4. **Fraisage des métaux**
   Par A. DOURNIER et R. SAGET.
5. **Rabotage et brochage**
   Par M. VIGNAUD et R. DIETRICH.
6. **Perçage, alésage, filetage**
   Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.
7. **Usinage par abrasion**
   Par A. CHEVALIER et R. LABILLE.
8. **Assemblage et montage**
   Par E. LECŒUR.
9. **Matériaux. Traitements**
   Par J. LIGNON et M. MIJON.
10. **Usinage sans copeaux**
    Par J. HIBOUT et M. ROGER.
11. **Étude de la coupe des métaux**
    Par A. CHEVALIER.
12. **Étude fonctionnelle des machines-outils**
    Par A. JOLYS, R. PASQUET et R. VACQUER.
13. **Métrologie dimensionnelle**
    Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.
14. **Automatisation des machines-outils**
    Par M. BERNARD.
15. **Organisation des ateliers**
    Par A. HEURLEY et J. ROLLET.
16. **Analyse des travaux**
    Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.
17. **Étude des temps d'exécution**
    Par A. CHEVALIER et le B. T. E.
18. **Bureau d'Études**
    Par M. DELANETTE.
19. **Montages d'usinage**
    Par A. CHEVALIER et R. VACQUER.
20. **Méthode de dessin industriel**
    Par A. CHEVALIER et H. RIBEROL.

Imprimé en France • DELAGRAVE-PARIS (10-67)